

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**ЛОНКИНА ДАРЬЯ ВЛАДИМИРОВНА**

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ЧАСТОТНО-  
СЕЛЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ВОЛНОВЕДУЩИХ СТРУКТУРАХ СО СЛОЖНЫМИ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ГРЕБНЯМИ И КУСОЧНО-СЛОИСТЫМ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ**

Специальность 01.04.03 – радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ростов-на-Дону – 2022



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность диссертационного исследования.** Использование все более высоких частот в работе инфокоммуникационных систем требует постоянного совершенствования характеристик основных элементов и устройств приемо-передающих узлов, таких как излучающие элементы, волноведущие тракты, фильтры, направленные ответвители, мультиплексоры, фазовращатели. Хорошо известно, что применение волноводной техники позволяет заметно увеличить передаваемую мощность, уменьшить потери, повысить добротности частотно-селективных элементов, а также позволяет эффективно работать на более высоких, чем микрополосковые и коаксиальные линии, частотах вплоть до терагерцового диапазона.

Для создания устройств с меньшими геометрическими размерами и для улучшения их характеристик используются волноводы со сложной геометрической формой поперечного сечения, а включение диэлектрических элементов позволяет дополнительно получить уникальные частотно-селективные и поляризационные свойства. Так, наибольшую популярность, как в отечественной, так и в зарубежной СВЧ - технике, приобрели прямоугольные и круглые волноводы с металлическими гребнями и кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением. Однако, несмотря на ряд значительных преимуществ, элементная база на круглых волноводах с металлическими гребнями не получила столь широкого распространения, как на прямоугольных волноводах. Стоит отметить, что применение цилиндрических волноведущих структур дает возможность работать не только на более высоких частотах в инфокоммуникационных системах, но и возможность использовать особые поляризационные свойства мод для соединения разных типов излучающих структур. Кроме того, данные структуры способны передавать более высокую мощность, что в свою очередь очень часто используется в бортовых радиолокационных системах. К тому же в последнее время появились работы, в которых сложные цилиндрические волноведущие структуры стали использоваться в качестве метаматериалов для замедляющих структур, зондов при оценке внутренней целостности компонентов в промышленных устройствах

и при неинвазивных способах диагностики в медицине, а также как резонаторы, формирующие однородное поле в системах электронного парамагнитного резонанса и участки передающих линий в системах нагрева методом электронного циклотронного резонанса.

Несмотря на возрастающую потребность использования цилиндрических волноведущих структур, существующие методы расчета их характеристик и алгоритмы, используемые для их анализа, обладают значительными ограничениями. Также новые области применения данных структур требуют исследований дополнительных характеристик и закономерностей. Поэтому сохраняется потребность в совершенствовании существующих и в разработке новых эффективных высокоскоростных методов и алгоритмов, которые необходимы для проектирования устройств на основе таких структур.

Таким образом, исследование цилиндрических волноведущих структур со сложным перечным сечением, усовершенствование и создание эффективных методов и высокоскоростных алгоритмов для расчета их электродинамических параметров, а также разработка устройств с использованием исследованных структур для применения в различных областях является необходимой и актуальной задачей.

**Целью диссертационной работы является:** исследование цилиндрических структур со сложными плоско-поперечными металло-диэлектрическими неоднородностями методом частичных областей, учитывающим особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня, и разработка селективных устройств на их основе.

Для достижения данной цели решены следующие **задачи**:

- Применен численно-аналитический метод частичных областей, учитывающий особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня, для цилиндрических структур с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением.

- Разработаны методики и алгоритмы для компьютерного моделирования силовых линий электромагнитных полей основной и высших мод в поперечном сечении круглого волновода с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением.
- Проведены электродинамический анализ и синтез тонких плоско-поперечных неоднородностей на базе круглого волновода с металлическими гребнями сложной формы.
- Осуществлен электродинамический расчет и проектирование полосно-пропускающих фильтров с четвертьволновыми связями на плоско-поперечных неоднородностях со сложной геометрической формой поперечного сечения в круглом волноводе.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит:

- В возможности применения численно-аналитического метода частичных областей, учитывающего особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня, для цилиндрических структур с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением.
- В разработке методики и алгоритма компьютерного моделирования и визуализации силовых линий электромагнитных полей основной и высших мод в поперечном сечении круглого волновода с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением.
- В исследовании и анализе частотных характеристик тонких плоско-поперечных неоднородностей на базе круглого волновода с металлическими гребнями сложной формы, позволяющих эффективно разрабатывать топологию полосно-пропускающих фильтров по заданным требованиям к амплитудно-частотной характеристике, максимально передаваемой мощности и добротности.
- В разработанных моделях и изготовленных макетах цилиндрических полосно-пропускающих фильтров с четвертьволновыми связями на неоднородностях со сложной геометрической формой поперечного сечения.

**Научная и практическая ценность** диссертационной работы.

Научная ценность диссертационной работы обосновывается показанной возможностью использования численно-аналитического метода частичных областей, учитывающего особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня, используемого для решения краевых задач широкого класса круглых волноводов с гребнями различной конфигурации и различным диэлектрическим заполнением.

Практическую важность представляют разработанные алгоритмы, которые используются при расчете электродинамических параметров цилиндрических структур с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением, на которые получено свидетельство о регистрации программного обеспечения, а также новые конструкции цилиндрических полосно-пропускающих фильтров на неоднородностях со сложной геометрической формой поперечного сечения.

Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках проекта № 19-37-90013 «Разработка и анализ электродинамических моделей цилиндрических волноведущих структур со сложным метало-диэлектрическим заполнением для проектирования перспективных частотно-селективных узлов инфокоммуникационных систем» в конкурсе на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»).

**Достоверность и обоснованность** полученных выводов диссертационной работы обеспечивается применением теоретически обоснованного метода расчета, сравнением результатов расчета алгоритма с результатами, приведенными в литературе, показанной сходимостью созданного алгоритма и экспериментальным подтверждением результатов расчета и синтеза устройств.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Развитие численно-аналитического метода частичных областей, учитывающего особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня,

для цилиндрических структур с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением.

2. Алгоритмы и программы электродинамического анализа параметров круглых волноводов с металлическими гребнями сложной формы и неоднородным диэлектрическим заполнением.
3. Возможность управления распределением электромагнитного поля в поперечном сечении круглого волновода для создания селективных устройств на плоско-поперечных неоднородностях.
4. Алгоритмы и программы анализа плоско-поперечных неоднородностей на базе круглого волновода с металлическими гребнями сложной формы.
5. Конструкции и изготовленные макеты цилиндрических полосно-пропускающих фильтров-прототипов разного порядка на металлических диафрагмах в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины.

*Таким образом, в диссертации проведены исследования, результаты которых имеют важное значение для разработки методов электродинамического анализа, создания расчетных алгоритмов и синтеза цилиндрических полосно-пропускающих фильтров на металлических диафрагмах в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины.*

**Личный вклад соискателя.** Соискателем самостоятельно выполнены поставленные задачи, необходимые для достижения цели исследования. В частности, развит метод, разработан алгоритм, поставлен эксперимент, проведены измерения, а также подготовлены основные публикации по диссертационной работе.

**Апробация работы.** Соискатель принял участие и докладывал основные результаты диссертационного исследования на следующих конференциях:

- International Conference «Acoustooptic and radar methods for information measurements and processing» (г. Суздаль, 2017 г.)
- International Scientific Conference «Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW» (п. Дивноморское, 2015 г., 2019 г., 2021 г.)

- International Conference «Actual problems of electron devices engineering, APEDE» (г. Саратов, 2018 г., 2020 г.);
- International Scientific-Techical Conference « Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE,» (г. Новосибирск 2018 г.)
- International Conference «Microwave and telecommunication technology» (CriMico) (г. Севастополь, 2019 г., 2020 г., 2021 г.)
- Moscow Workshop «Electronic and Networking Technologies, MWENT» (г. Москва, 2020 г.).
- International Conference «Progress in electromagnetics research symposium, PIERS» (г. Ханчжоу, 2021 г.)

**Публикации по теме диссертационного исследования.** Соискателем подготовлено 20 печатных работ: 6 статей, в которых отражены основные выводы и результаты диссертационной работы, опубликованы в журналах, входящих в список ВАК и список диссертационного совета по радиофизике Южного федерального университета; 12 тезисов докладов на международных конференциях; 11 работ автора включены в международную библиографическую и реферативную база данных Scopus. На созданный алгоритм расчета получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении диссертации* обозначены тема диссертации, цели научного исследования, методы достижения целей; приведены выносимые на защиту положения; перечислены опубликованные по теме диссертации материалы; дано описание краткого содержания диссертации.

*В первой главе* представлен анализ научно-исследовательских работ по круглым волноводам с различными неоднородностями, в частности по методам, которые используются для расчета электродинамических параметров. Показаны возможности применения круглых волноводов простого и слож-

ного сечения в различных областях. Представлен анализ достоинств и недостатков методов расчета и изучены возможности применения данных структур в новых направлениях.

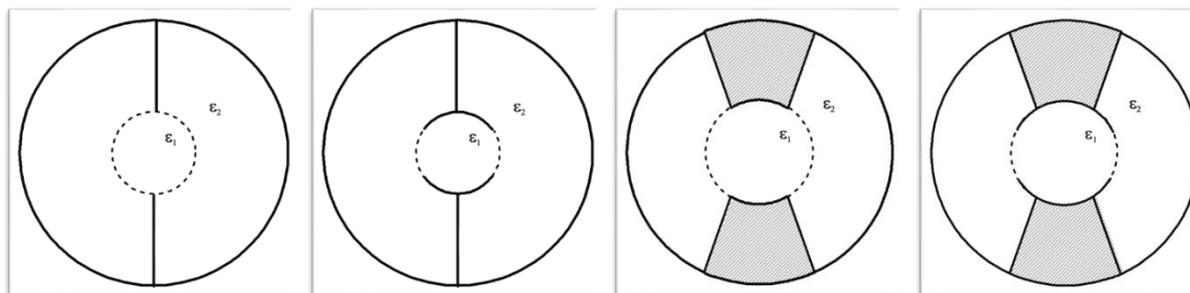


Рис. 1. Исследуемые структуры

Во второй главе с использованием метода частичных областей, учитывающего особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня, произведен расчет и определение нормированных критических волновых чисел, модового состава структур, постоянных распространения и компонент электромагнитных полей основной и высших типов мод для круглого волновода с металлическими гребнями сложной формы и слоистым диэлектрическим заполнением (Рис.1), позволяющим производить разбиение на две частичные области с учетом симметрии структуры (Рис.2).

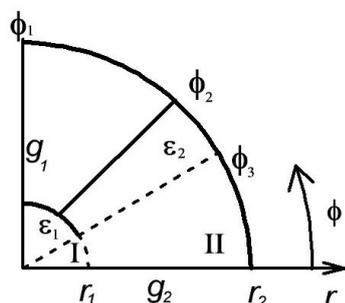


Рис.2 Сектор исследуемой структуры

С учетом особенности геометрии исследуемой структуры и наличием радиальных ребер будем использовать цилиндрическую систему координат. Тогда решение уравнения Гельмгольца для продольной составляющей электрического  $\vec{P}^e$  и магнитного  $\vec{P}^h$  векторов Герца представляем в виде:

$$P^{h,w} = \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{h,w} R_m^{h,w}(\beta_w r) \cos\left(\nu_{w,m}\varphi - \frac{\pi}{2}g_2\right) e^{-j\gamma z}; \quad (1)$$

$$P^{e,w} = \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{e,w} R_m^{e,w}(\beta_w r) \sin\left(\nu_{w,m}\varphi + \frac{\pi}{2}g_2\right) e^{-j\gamma z} \quad (2)$$

$$R_m^{h,1}(r) = J_{\nu_{1,m}}(\beta_1 r); \quad R_m^{h,2}(r) = J_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r) - L_m N_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r) \quad (3)$$

$$R_m^{e,1}(r) = J_{\nu_{1,m}}(\beta_1 r); \quad R_m^{e,2}(r) = J_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r) - P_m N_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r) \quad (4)$$

$$\nu_{1,m} = \left( m\pi/\varphi_1 + |g_2 - g_1| \pi/2\varphi_1 \right); \quad \nu_{2,m} = \left( m\pi/\varphi_2 + g_2 \pi/2\varphi_1 \right) \quad (5)$$

$$L_m = \frac{J'_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r_2)}{N'_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r_2)}; \quad P_m = \frac{J_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r_2)}{N_{\nu_{2,m}}(\beta_2 r_2)} \quad (6)$$

где  $w = 1, 2$  – номер области;  $g_1, g_2$  – граничные условия типа электрической стенки  $g_{1,2} = 0, E_z = 0, \frac{\partial H_z}{\partial n} = 0$  и граничные условия типа магнитной стенки  $g_{1,2} = 1, \frac{\partial E_z}{\partial n} = 0, H_z = 0$ , используемые для обозначения типа волн в волноводе  $H_{g_1 g_2}^q, E_{g_1 g_2}^q, HE_{g_1 g_2}^q, EH_{g_1 g_2}^q$ ,  $q$  – порядок моды;  $\xi = e, h$  – соответствует электрическому  $\vec{P}^e$  и магнитному  $\vec{P}^h$  векторам Герца,  $A_m^{h,w}, A_m^{e,w}$  – числовые коэффициенты,  $J_{\nu_w m}(\beta_w r), N_{\nu_w m}(\beta_w r)$  – функции Бесселя первого и второго рода соответственно.

На границе первой и второй областей введем две функции  $f_k(\varphi), k = 1, 2$ , такие что  $E_\varphi^w|_{r=r_1} = f_1(\varphi), E_z^w|_{r=r_1} = f_2(\varphi)$ . Функции  $f_k(\varphi)$  определим следующим образом:  $f_k(\varphi) = \sigma_k(\varphi) \sum_{i=0}^{\infty} Q_{k,i} \chi_{k,i}(\varphi)$ , где  $Q_{k,i}$  – неизвестные числовые коэффициенты, подлежащие определению;  $\sigma_k(\varphi) = \left( 1 - \left( \frac{\varphi}{\varphi_3} \right)^2 \right)^{\tau-2+k}$  – весовой множитель, учитывающий особенность поведения поля;  $\chi_{k,i}(\varphi)$  – полиномы Гегенбауэра  $C_i$  при  $\tau \neq 1/2$  и полиномы Чебышева первого  $T_i$  и второго рода  $U_i$  при  $\tau = 1/2$ , а  $\tau$ - показатель особенности, который определяется как: 1)  $\varphi_3 \neq \varphi_2 \tau = \frac{1}{2}$ ; 2)  $\varphi_3 = \varphi_2 \neq \varphi_1 \tau = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{1 + 2\varepsilon_2/\varepsilon_1}$ ; 3)  $\varphi_3 = \varphi_2 = \varphi_1 \tau = \frac{1}{\pi} \arccos \frac{1-\varepsilon_2/\varepsilon_1}{1+\varepsilon_2/\varepsilon_1}$ . Для нахождения нормированных критических волновых чисел  $k_c r$  и постоянных распространения  $\gamma_r$  необходимо определить неизвестные коэффициенты  $Q_{k,i}$ , используя равенство компонент поля  $H_z^w, H_\varphi^w$  на границе первой и второй областей.

На основе данного метода разработан алгоритм и программа расчета электродинамических параметров волноводов и визуализации картин электромагнитного поля. Для проверки разработанного алгоритма были рассчитаны нормированные критические волновые числа круглого волновода с вы-

веденными гребнями и проведено сравнение результатов со строгим решением для полого круглого волновода. Исследование сходимости алгоритма и сравнение с результатами, полученными из пакета CST Studio Suite, показало: для Н-волн наблюдается монотонное убывание нормированных критических волновых чисел и асимптотическое приближение, тогда как для Е-волн наблюдается монотонное возрастание нормированных критических волновых чисел и асимптотическое приближение. Сравнение показало хорошее совпадение результатов.

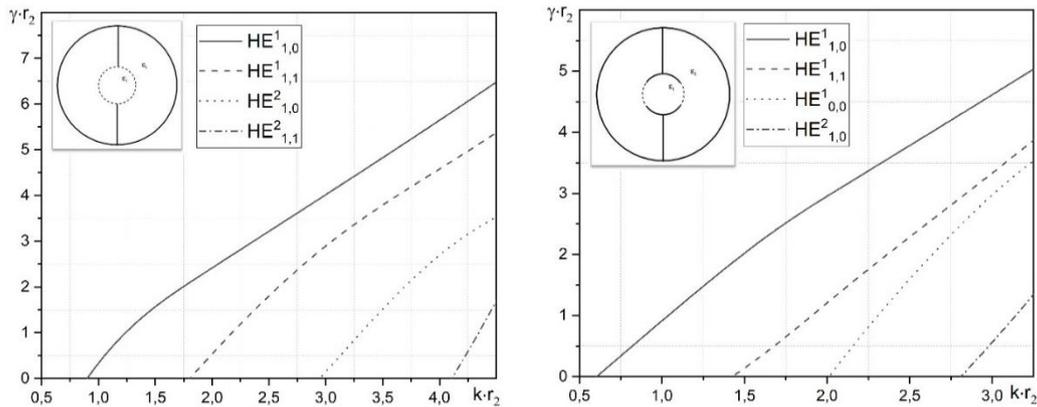


Рис.3 Нормированные постоянные распространения первых четырех мод гибридных волн от  $kr_2$

На рис.3 в качестве примера показано изменение нормированных постоянных распространения при изменении рабочего волнового числа для круглого волновода с размерами  $r_1/r_2 = 0.35$ ;  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \pi/2$  и  $\varphi_3 = \pi/2 - 1.0$ ,  $\varepsilon_2 = 1.0$ ,  $\varepsilon_1 = 1.0$  и  $\varepsilon_1 = 3.0$ . Как видно из рис. 3 добавление кольцевых сегментов приводит к тому, что распространение волн начинается при меньшем нормированном рабочем волновом числе.

На рис.4 представлена визуализация силовых линий электромагнитного поля для второй и третьей высших мод Н-волн. Изменение диэлектрической проницаемости в пространстве между кольцевыми сегментами приводит к изменению нормированной постоянной распространения первой, второй и третьей гибридных мод (рис.5). Нормированная постоянная распространения четвертой гибридной моды практически не изменяется, так как у нее основная часть силовых линий находится за областью, содержащей диэлектрик.

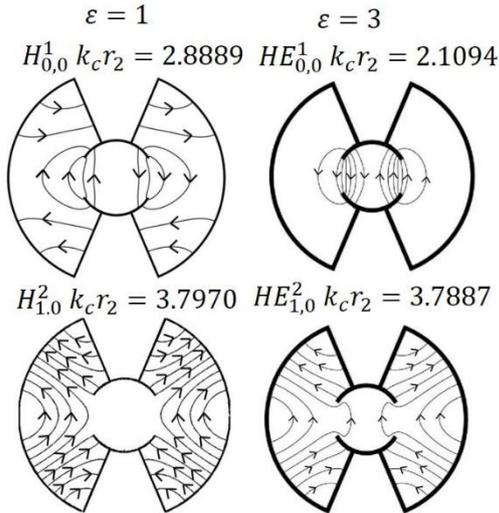


Рис.4 Поперечная структура электромагнитных полей H- и HE-волн

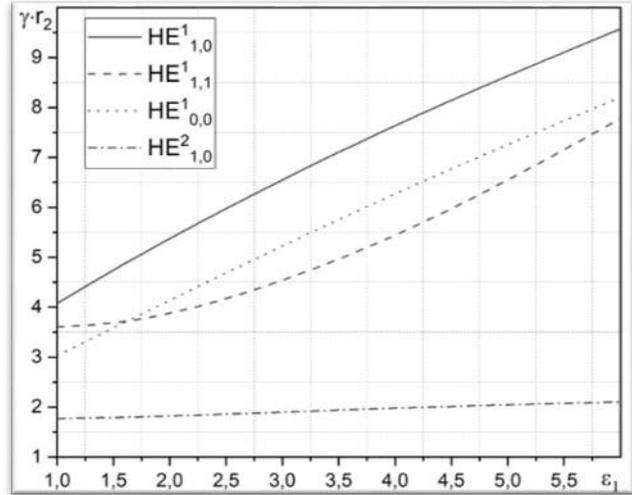


Рис.5 Зависимость нормированных постоянных распространения для первых четырех гибридных мод от  $\varepsilon_1$ .

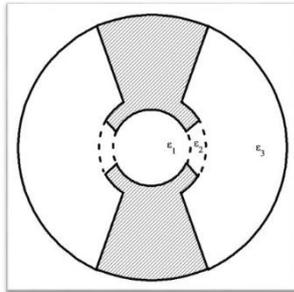


Рис.6 Исследуемая структура

В третьей главе с использованием метода частичных областей, учитывающего особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня, решена аналогичная главе 2 задача расчета, но для круглого волновода с радиальными гребнями, кольцевыми сегментами конечной толщины и слоистым диэлектрическим заполнением

(Рис.6), позволяющим производить разбиение на три частичные области с учетом симметрии структуры (Рис.7). В отличие от главы 2, данная структура имеет конечную толщину кольцевого сегмента, которая добавляет еще одну частичную область при расчетах. Разбиение на частичные области проводится следующим образом: 1)  $r \in [0, r_1], \varphi \in [0, \varphi_1]$  - первая частичная область; 2)  $r \in [r_1, r_2], \varphi \in [0, \varphi_3]$  - вторая частичная область; 3)  $r \in [r_2, r_3], \varphi \in [0, \varphi_2]$  - третья частичная область.

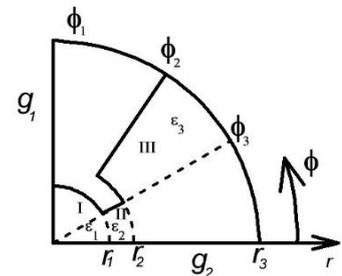


Рис.7 Сектор исследуемой структуры

Решение уравнения Гельмгольца будем искать аналогично главе 2. Главное отличие в представлении состоит в том, что на границе второй частичной области нет граничных условий, заданных в явном виде. Поэтому приведем запись векторов Герца только для второй частичной области:

$$\Pi^{h,2} = \sum_{m=0}^{\infty} R_m^{h,2}(\beta_2 r) \cos\left(v_{2,m}\varphi - \frac{\pi}{2}g_2\right) e^{-j\gamma z}; \quad (7)$$

$$\Pi^{e,2} = \sum_{m=0}^{\infty} R_m^{e,2}(\beta_2 r) \sin\left(v_{2,m}\varphi + \frac{\pi}{2}g_2\right) e^{-j\gamma z} \quad (8)$$

$$R_m^{h,2}(r) = B_m^h J_{v_{2,m}}(\beta_2 r) + R_m^{e,2}(r) = B_m^e J_{v_{2,m}}(\beta_2 r) + C_m^e N_{v_{2,m}}(\beta_2 r) \quad (9)$$

$$C_m^h N_{v_{2,m}}(\beta_2 r);$$

$$v_{2,m} = \left(m\pi/\varphi_3 + g_2 \pi/2\varphi_3\right) \quad (10)$$

где  $B_m^h, C_m^h, B_m^e, C_m^e$  – неизвестные коэффициенты. В отличие от структуры, рассмотренной во второй главе, имеем две границы раздела частичных областей при  $r = r_1$  и  $r = r_2$ . Поэтому введем четыре функции  $f_k(\varphi), k = 1, 2, 3, 4$  на границе раздела первой и второй, второй и третьей областей соответственно, такие что:  $E_\varphi^w|_{r=r_1} = f_1(\varphi), E_z^w|_{r=r_1} = f_2(\varphi), E_\varphi^w|_{r=r_2} = f_3(\varphi), E_z^w|_{r=r_2} = f_4(\varphi)$ . Функции  $f_k(\varphi)$  определим аналогичным образом. Отличие состоит в показателе особен-

ности  $\tau$ , который в данном случае рассчитывается как:  $\tau_{12} = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{1 + \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}$

и  $\tau_{23} = \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{1 + \frac{2\varepsilon_3}{\varepsilon_2}}$ . Тогда на разделе первой и второй, второй и третьей областей соответственно получаем:

$$E_\varphi^w|_{r=r_1} \sim f_1(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} Q_i \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_2}\right)^2\right)^{\tau_{12}-1} C_i^{\tau_{12}-1/2} \left(\frac{\varphi}{\varphi_2}\right) \quad (11)$$

$$E_z^w|_{r=r_1} \sim f_2(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} Q_i \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_3}\right)^2\right)^{\tau_{12}} C_i^{\tau_{12}} \left(\frac{\varphi}{\varphi_3}\right) \quad (12)$$

$$E_\varphi^w|_{r=r_2} \sim f_3(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} Q_i \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_3}\right)^2\right)^{\tau_{23}-1} C_i^{\tau_{23}-1/2} \left(\frac{\varphi}{\varphi_3}\right) \quad (13)$$

$$E_z^w|_{r=r_2} \sim f_4(\varphi) = \sum_{i=0}^{\infty} Q_i \left(1 - \left(\frac{\varphi}{\varphi_3}\right)^2\right)^{\tau_{23}} C_i^{\tau_{23}} \left(\frac{\varphi}{\varphi_3}\right) \quad (14)$$

Для нахождения необходимых электродинамических параметров рассматриваем СЛАУ, полученную согласно следующим выражениям:  $H_z^1|_{r=r_1} = H_z^2|_{r=r_1}, H_z^2|_{r=r_2} = H_z^3|_{r=r_2}, H_\varphi^1|_{r=r_1} = H_\varphi^2|_{r=r_1}, H_\varphi^2|_{r=r_2} = H_\varphi^3|_{r=r_2}$ . Для исследования описанной структуры был также создан вычислительный алгоритм, основываясь на используемом методе. Достоверность алгоритма была проверена сравнением результатов расчета с результатами, приведенными в литературе для полого круглого волновода. Также было проведено сравнение с круглым

волноводом с конечными гребнями и кольцевыми сегментами бесконечно тонкой толщины.

На рис.8 представлена визуализация силовых линий электромагнитного поля для третьей и четвертой высших мод E-волн. Изменение диэлектрической проницаемости в пространстве между кольцевыми сегментами приводит к изменению нормированной постоянной распространения первой, второй и третьей гибридных мод (рис.9). Нормированная постоянная распространения четвертой гибридной моды практически не изменяется, так как у нее основная часть силовых линий находится за областью, содержащей диэлектрик.

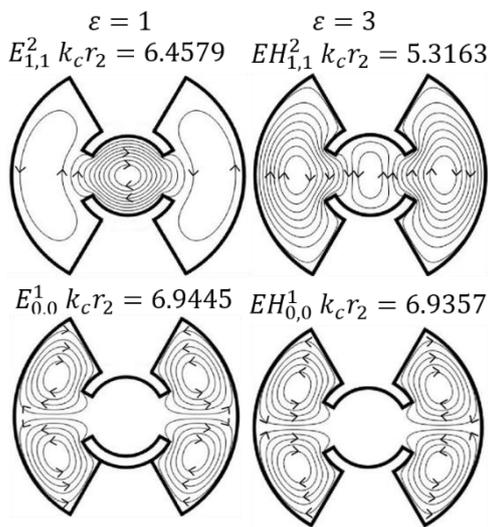


Рис.8 Поперечная структура электромагнитных полей H- и HE-волн

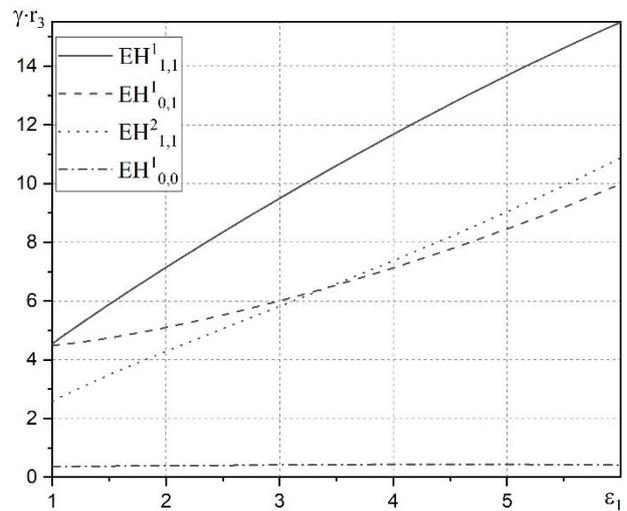


Рис.9 Зависимость нормированных постоянных распространения для первых четырех гибридных мод от  $\varepsilon_1$

Разработанный алгоритм позволяет оценить влияние ребер на электродинамические параметры структуры. На рис. 10 для волновода с размерами  $r_1/r_3 = 0.35$ ,  $r_2/r_3 = 0.45$ ,  $\varphi_1 = \pi/2$ ,  $\varphi_2 = \pi/3$ ,  $\varphi_3 = \pi/6$ ,  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 1.0$  показано влияние угла кольцевого сегмента на нормированные критические волновые числа структуры. Изменение угла кольцевого сегмента  $\varphi_3$  наиболее сильно влияет на нормированные критические волновые числа мод  $H_{0,0}^1$ . Такое изменение связано с распределением линий электромагнитного поля у данных мод: у третьей моды H-волн часть силовых линий находится между кольцевыми сегментами. Изменение угла кольцевого сегмента практически не влияет на нормированные критические волновые числа мод  $H_{1,0}^2$ , так силовые линии данной

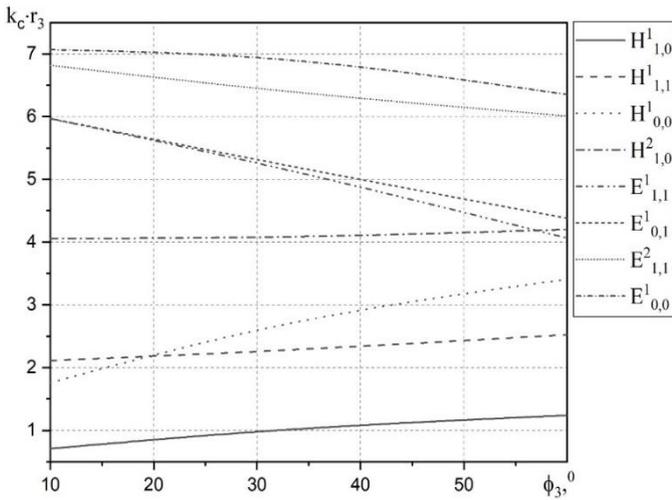


Рис.10 Нормированные критические волновые числа при изменении  $\phi_3$  для модового состава структуры

моды практически отсутствуют в пространстве между кольцевыми сегментами. В отличие от структуры с бесконечно тонкими кольцевыми сегментами увеличение толщины кольцевых сегментов приводит к тому, что при значениях угла кольцевого сегмента  $\phi_3 \in [10^\circ, 20^\circ]$  моды  $H_{1,1}^1$  и  $H_{0,0}^1$  меняются местами: нормированное критическое волновое число моды  $H_{0,0}^1$  становится меньше нор-

мированного критического волнового числа моды  $H_{1,1}^1$ .

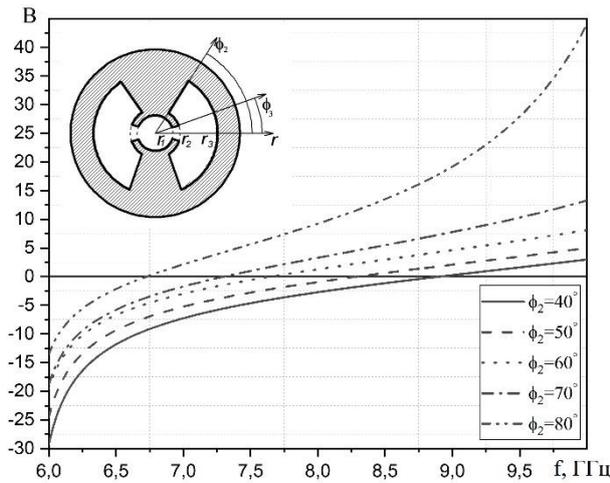
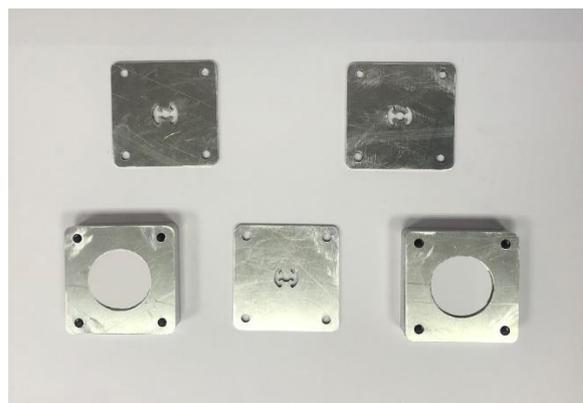
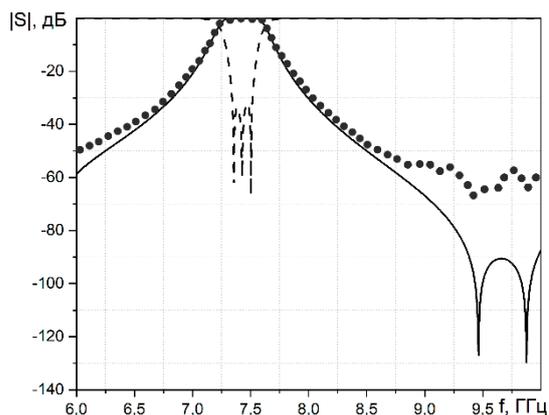


Рис.11 Зависимость мнимой части проводимости одиночной диафрагмы от частоты при различных значениях угла радиального гребня

В четвертой главе показана возможность использования круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины в качестве резонансных диафрагм при синтезе полосно-пропускающих цилиндрических волноводных фильтров. Чтобы учесть изменение поведения волны на неоднородности ищем коэффициенты отражения  $\Gamma_q^\xi$  и прохождения  $T_q^\xi$  по формулам:  $1 +$

$\Gamma_1^h = \int_L \vec{E}_N(r, \varphi) \sigma_1^h \vec{E}_1^h(r, \varphi) dL$ ,  $\Gamma_q^\xi = T_q^\xi = \int_L \vec{E}_N(r, \varphi) \sigma_q^\xi \vec{E}_q^\xi(r, \varphi) dL$ , где  $\vec{E}_N(r, \varphi)$ - электрическое поле на неоднородности,  $\vec{E}_q^\xi(r, \varphi)$ - собственная функция волновода, зная которые можем рассчитать проводимость диафрагмы.

В качестве примера на рис. 11 показана зависимость мнимой части проводимости одиночной диафрагмы в круглом волноводе с диаметром  $d = 30$  мм от частоты при значениях угла радиального гребня от  $40^\circ$  до  $80^\circ$ . Из рис.11 видно, что при увеличении угла радиального гребня  $\varphi_2$  резонансная частота смещается влево в область более низких частот, а добротность одиночной резонансной диафрагмы увеличивается.



*Рис.12 АЧХ синтезированного фильтра и*

*Рис.13 Изготовленный прототип полосно-пропускающего фильтра третьего порядка*

На рис.12 показана АЧХ полосно-пропускающего фильтра третьего порядка на сложных резонансных диафрагмах с четвертьволновыми связями в круглом волноводе, а на рис. 13 его элементы. Пунктирной линией изображен модуль коэффициента отражения  $|S_{11}|$ , сплошной линией – модуль коэффициента передачи  $|S_{21}|$  синтезированного фильтра, а круглыми маркерами - результаты измерений, полученные при эксперименте. Ширина полосы пропускания изготовленного фильтра – 400 МГц, неравномерность коэффициента передачи в полосе пропускания – до  $-0.7$  дБ, а коэффициент отражения не хуже  $-33$  дБ. Также стоит отметить наличие двух полюсов на частотах 8.98 ГГц и 9.34 ГГц, которые позволяют повысить селективность фильтра. Сравнение характеристики фильтра прототипа и характеристики изготовленного фильтра показывает хорошее совпадение, что говорит о корректности проведенных расчетов.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основными результатами являются применение численно-аналитического метода частичных областей, учитывающего особенность поведения электромагнитного поля вблизи гребня для цилиндрических структур со сложными металлическими гребнями и неоднородным диэлектрическим заполнением; методики и алгоритмы для компьютерного моделирования силовых линий электромагнитных полей основной и высших мод в поперечном сечении; исследования резонансных свойств, полученных при рассмотрении и обобщении результатов расчета одиночных металлических диафрагм со сложной геометрической формой поперечного сечения на базе круглого волновода с радиальными гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины, а также модели и экспериментальные макеты новых селективных устройств на базе круглых волноводов.

Рассчитанные нормированные критические волновые числа структур с различными граничными условиями на внешнем контуре позволили найти модовый состав. Приведенная визуализация картин электромагнитного поля позволяет оценить влияние наличия диэлектрического материала между кольцевыми сегментами и изменения конфигурации гребня на модовый порядок в структурах. Было установлено, что наличие диэлектрика искажает силовые линии электромагнитного поля, втягивая их в область, содержащую диэлектрик. При этом наличие кольцевых сегментов для мод с силовыми линиями, расположенными в пространстве между гребнями и кольцевыми сегментами по краям структуры, препятствует втягиванию силовых линий в пространство между гребнями. Также усложнение формы гребня и добавление конечной толщины кольцевых сегментов расширяет одномодовый режим работы по сравнению с полым круглым волноводом. Кроме того, добавление кольцевых сегментов приводит к тому, что в случае наличия диэлектрика в пространстве между гребнями нормированное рабочее волновое число уменьшается и гибридные волны начинают распространяться на более низких частотах.

На основе исследованных волноводных структур были рассчитаны бесконечно тонкие плоско-поперечные металлические резонансные диафрагмы с апертурой в форме радиального гребня и кольцевого сегмента конечной толщины. Показано, что наибольшее влияние на резонансную частоту и добротность диафрагмы оказывают угол радиального гребня  $\varphi_2$  и угол кольцевого сегмента  $\varphi_3$ . Внешний радиус  $r_3$  одиночной диафрагмы практически не влияет на добротность диафрагмы. Однако значительно смещает резонансную частоту.

Разработаны конструкции двух полосно-пропускающих фильтров третьего и пятого порядка на резонансных диафрагмах с четвертьволновыми связями с полосами пропускания 7.22 -7.62 ГГц и 7.17 -7.63 ГГц. соответственно. Данные фильтры построены на круглом волноводе с диаметром  $d = 30$  мм. Продольный размер фильтра третьего порядка составил 26.34 мм., а для фильтра пятого порядка - 43.66 мм. По синтезированным моделям изготовлены прототипы полосно-пропускающих фильтров. Экспериментальное сравнение показало хорошее совпадение характеристик фильтров с теоретическим расчетом, что говорит о высокой точности синтезированных моделей и о достоверности разработанных алгоритмов.

Таким образом, представленные результаты говорят о том, что поставленная цель исследования достигнута. Показана возможность использования метода для расчета различных круглых волноводов. Разработанные алгоритмы расчетов электродинамических параметров круглых волноводов с металлическими гребнями и кольцевыми сегментами конечной толщины используются в качестве начального приближения при проектировании селективных устройств. Дальнейшее развитие темы диссертационного исследования связано с еще большим уменьшением геометрических размеров фильтров при сохранении прежних характеристик за счет введения дополнительных связей между диафрагмами, а также с возможностью использования структур с подобной формой геометрического сечения в качестве метаматериалов при проектировании замедляющих структур.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

### **Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК и базу Scopus:**

1. Лонкина Д.В. Частотно-селективные устройства на круглых волноводах с двумя Т-образными ребрами / Губский Д.С., Земляков В.В., Лонкина Д.В., Синявский Г.П. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2015. -Т. 20. -№ 6. -С. 27-32.
2. Лонкина Д.В. Электродинамический анализ электромагнитный полей круглого волновода с тонкими металлическими ребрами / Губский Д.С., Земляков В.В., Лонкина Д.В. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. -2017. -Т. 29. -№4. -С.11 – 17
3. Lonkina D.V Electrodynamic analysis of a circular waveguide with thin metal ribs/ Gubsky D.S., Zemlyakov V.V., Lonkina D.V. // Radiophysics and Quantum Electronics. -2018. -Т. 61. -№ 5. -С. 362-373.
4. Lonkina D.V. Compact band-pass filter based on a circular waveguide with two T-shaped ridges / Gubsky D.S., Zemlyakov V.V., Lonkina D.V. // Journal of Communications Technology and Electronics. -2019. -Т. 64. -№ 1. -С. 20-25
5. Lonkina, D.V. Cylindrical Waveguiding Structures with Complex Cross Sections in Microwave Units of Modern Information and Communication Systems /Lonkina, D.V., Gubskii, D.S., Zemlyakov, V.V. // Journal of Communications Technology and Electronics. -2020. -Т. 65. -№ 9. -С. 967-981.
6. Лонкина Д.В. Метод частичных областей для электродинамического расчёта цилиндрических структур с металлическими радиальными Т-рёбрами и неоднородным диэлектрическим заполнение / Лонкина Д.В., Земляков В.В., Губский Д.С., Заргано Г.Ф., Крутиев С.В. // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. -2021. -Т. 64. -№ 5. -С. 395-409

### **Свидетельство о регистрации:**

Лонкина Д.В. Губский Д.С., Земляков В.В., Лонкина Д.В. Электродинамический анализ круглого волновода с тонкими металлическими ребрами // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018665664, 06.12.2018.