

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.372.81.09

НАРАНОВИЧ
Оксана Ивановна

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТРОЙСТВ СВЧ НА
НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ
ВКЛЮЧЕНИЯМИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 - Радиофизика

Минск, 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

Синицын Анатолий Константинович,
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского университета информатики и радиоэлектроники

Официальные оппоненты:

Ерофеев Виктор Тихонович,
доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник учреждения БГУ «Научно-исследовательский институт прикладных проблем математики и информатики»

Дробот Сергей Викторович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация

Научно-исследовательский институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Необходимость улучшения характеристик и повышения мощности электровакуумных усилителей и генераторов СВЧ предъявляет жесткие требования к качеству как их электродинамических систем, так и выходных устройств этих приборов. Электродинамические системы современных мощных электровакуумных приборов СВЧ (гиротронов, релятивистских ламп бегущей и обратной волны), а также их устройства ввода и вывода энергии, представляют собой отрезки круглых волноводов симметричных волн с продольно нерегулярным профилем. Для реализации резонансных свойств электродинамических систем в мощных генераторах СВЧ находят широкое применение отражающие фильтры брегговского типа, а также рефлекторы в виде резонансных канавок на стенке волновода. При выводе энергии из сверхмощных генераторов используются диэлектрические окна, отделяющие вакуумное пространство от окружающей среды. Часто такие диэлектрические окна располагают на апертуре рупора. При высокой СВЧ мощности кроме обеспечения основных функциональных свойств на первый план выступает необходимость снижения порога электрического пробоя на стенках таких устройств, что в принципе решается за счет реализации плавных сопряжений и переходов.

Однако синтез устройств с плавным профилем стенки волновода возможен только на основе модели, использующей решение полных уравнений Максвелла, т.к. классические упрощенные модели на основе эквивалентных схем, частичных областей в этом случае неприемлемы. Стандартные пакеты типа MATLAB, FEMLAB на основе методов конечных элементов также не всегда приемлемы из-за значительных вычислительных затрат и необходимости реализации граничных условий излучения на открытых концах нерегулярного отрезка волновода. Эффективные для полых волноводов проекционные методы требуют значительных вычислительных затрат при решении задач для волноводов с частичным диэлектрическим заполнением.

Поэтому, актуальными являются, как предложенный в работе эффективный сеточный метод решения уравнений Максвелла для симметричных волн в продольно нерегулярном волноводе с неоднородным диэлектрическим заполнением при граничных условиях излучения, так и выявленные с его использованием физические закономерности прохождения волн в таких устройствах, а также выполненный синтез устройств с заданными характеристиками – фильтров, диэлектрических диафрагм и рупоров для вывода энергии с диэлектрическим окном на апертуре, скомпенсированных по отражению основной волны.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Одним из основных научных направлений БГУИР является «Методы моделирования и оптимизации радиочастотных систем и устройств», в рамках которого выполнена диссертация. Результаты диссертационной работы нашли своё отражение в отчетах следующих госбюджетных НИР, выполняющихся на кафедрах «ВМиП», «АиУСВЧ» в период с 2006 по 2010 г.:

- х/д № 10-1096Б «Разработать пакет программ и выполнить оптимизацию профиля нерегулярной гофрированной электродинамической системы генератора СВЧ в диапазоне 5-10 ГГц», 2010 г.;

- х/д № 09-1044Б «Расчитать распределение электрического поля замедляющей системы резонатора в виде синусоидального гофра», 2009 г.;

- ГБЦ 06-7004 по договору с БРФФИ № Ф06Р-058 от 1.04.2006 г. «Нелинейная динамика процессов взаимодействия релятивистских электронных потоков с электромагнитными полями», 2006-2008 г.

Цель и задачи исследования

Целью работы является создание эффективной методики решения краевой задачи о распространении симметричных волн в продольно-нерегулярном отрезке волновода кругового сечения с неоднородным диэлектрическим заполнением и ее приложение к синтезу и исследованию характеристик устройств СВЧ на отрезках нерегулярного волновода - фильтров, диэлектрических окон и рупоров.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать эффективную методику решения краевой задачи о распространении симметричных волн в отрезке круглого нерегулярного волновода с диэлектрическими вставками на основе метода преобразования координат и сеточного метода, полезно использующего регулярность границ в преобразованной системе координат.

2. Исследовать закономерности преобразования и отражения симметричных H -волн на нерегулярности границы волновода в виде одиночной канавки и отрезка периодических гофр, выполнить синтез заграждающих фильтров с такими профилями и провести исследование их полосовых свойств.

3. Выявить закономерности отражения симметричных H и E -волн при их прохождении через диэлектрические диафрагмы в волноводе кругового сечения и разработать способы компенсации отражения за счет использования нерегулярного профиля границы волновода.

4. Установить особенности прохождения и отражения симметричных H и E волн в рупоре кругового сечения с диэлектрической диафрагмой в его раскрыве. Выявить возможность компенсации отражения волн от диэлектрической

диафрагмы, а также возможность подавления высших типов на апертуре за счет оптимизации нерегулярности профиля рупора.

Объектом исследования являются продольно-нерегулярные волноводы кругового поперечного сечения с неоднородным диэлектрическим заполнением и рабочими типами мод H_{0i} или E_{0i} .

Предмет исследования – методика решения краевых задач для нерегулярных волноводов с неоднородным диэлектрическим заполнением на H_{0i} и E_{0i} модах с применением методов преобразования координат и сеточного метода; закономерности переотражения волн на нерегулярностях границы и диэлектрических вставках; характеристики СВЧ устройств на отрезках нерегулярных волноводов с оптимальным профилем и частичным диэлектрическим заполнением.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная эффективная методика решения задач электродинамики нерегулярных волноводов симметричных волн с неоднородным диэлектрическим заполнением, основанная на методе преобразования координат, получении скалярной краевой задачи в преобразованной системе и предложенном сеточном методе блочной матричной прогонки ее решения. Быстродействие разработанной компьютерной программы и сокращение объема требуемой оперативной памяти достигается выбором структур данных в виде массива стеков и оптимизации кода программы.

2. Найденные оптимальные профили нерегулярности границы волновода в виде канавки и синусоидального гофра, при которых обеспечивается практически полное отражение H_{01} волны за счет резонансного взаимодействия волн, а также установленные закономерности изменения профиля при изменении радиуса волновода.

3. Предложенные способы компенсации отражения H_{01} и E_{01} волн от диэлектрического окна с помощью канавки-рефлектора или выступа на стенке волновода, выявленные зависимости изменения параметров компенсаторов с изменением радиуса волновода и установленные закономерности прохождения волн через систему рефлектор-диафрагма в условиях компенсации.

4. Установление того факта, что в рупоре симметричной H или E волн с помещенной в его раскрыве диэлектрической диафрагмой за счет эффекта переотражения волн в системе рупор-диафрагма возможна, как полная компенсация отражения волн от диэлектрической диафрагмы, так и обеспечение отсутствия высших типов волн на апертуре за счет оптимально подобранного профиля.

Личный вклад соискателя

Научным руководителем А.К. Сеницыным была предложена область и основные направления исследований, осуществлялось общее руководство. Совместно с А.К. Сеницыным проводилось обсуждение способов и методов ре-

шения поставленных задач, оценка полученных результатов. Основными соавторами по опубликованным работам являются: профессор А.К. Сеницын и профессор А.А. Кураев.

Диссертантом решены конкретные задачи на основе сформулированного математического аппарата и разработанных компьютерных программ, проведен анализ полученных результатов и сформулированы выводы.

Апробация результатов диссертации

Материалы диссертации докладывались на 17-й, 18-й, 19-й, 20-й международных Крымских микроволновых конференциях: КрыМиКо'2007, КрыМиКо'2008, КрыМиКо'2009, КрыМиКо'2010, Украина, Севастополь; International Vacuum Electronics Conference: USA, 2008, Italy, 2009, USA, 2010, India, 2011; на 3-й, 4-й, 5-й международных молодежных научно-технических конференциях: Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007», «РТ-2008», «РТ-2009», Украина, Севастополь; международной научно-практической конференции «Веб-программирование и Интернет-технологии WebConf09», Минск, 2009; международной научно-практической конференции «Современная Радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров», Минск, 2006; на международных научно-практических студенческих конференциях «Содружество наук», Барановичи 2006, 2008, 2009; на международных научно-практических конференциях, Барановичи 2007, 2009, 2010.

Опубликованность результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 27 научных работ. Из них 6 научных статей в журналах, входящих в перечень ВАК (2,1 а. л.), 1 статья в других научных изданиях (0,35 а. л.), 20 публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. В первой главе получена эффективная методика решения задач электродинамики нерегулярных волноводов симметричных волн с неоднородным диэлектрическим заполнением. Во второй главе найдены оптимальные профили нерегулярности границы волновода, при которых обеспечивается практически полное отражение H_{01} волны. В третьей и четвертой главах предложены способы компенсации отражения H_{01} и E_{01} волн от диэлектрического окна и обеспечение отсутствия высших типов волн на апертуре рупора за счет оптимально подобранного профиля. Общий объем работы составляет 104 страницы, в том числе 48 рисунков на 15 страницах, 4 таблицы на одной странице, 2 приложения на 7 страницах и список использованных источников, включающий 97 наименований (в том числе 27 публикаций соискателя) на 9 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, которая определяется необходимостью решения таких научных проблем, как синтез устройств СВЧ (фильтры, резонаторы, рупоры) с плавным профилем стенки волновода и диэлектрическими диафрагмами, создание эффективных методов решения краевых задач для уравнений Максвелла, описывающих симметричные электромагнитные волны в таких устройствах.

Первая глава посвящена разработке методов моделирования распространения и дифракции симметричных H и E волн на основе преобразования координат, отображающих продольно-нерегулярный круглый волновод в цилиндр единичного радиуса, и эффективного сеточного метода, полезно использующего регулярность границ расчетной области в преобразованной системе.

В результате преобразования уравнений Максвелла для симметричных E и H волн в нерегулярном круглом волноводе с неоднородным диэлектрическим заполнением, в новой системе координат сформулированы скалярные задачи для волновода единичного радиуса. Например, для E -волн скалярная задача имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\varepsilon \rho} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{b'}{\varepsilon b} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) - \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{b'}{\varepsilon b} \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1 + (b'\rho)^2}{b^2 \varepsilon \rho} \frac{\partial u}{\partial \rho} \right) = -\frac{W^2}{\rho} u;$$

$$u|_{\rho=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial u}{\partial \rho} - \frac{bb'}{1 + b'^2} \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{\rho=1} = 0,$$

где $0 \leq z \leq L$, $u(\rho, z) = \rho B_\psi$, $b(z)$ – профиль волновода, $b'(z)$ – его производная, $\rho = r/b(z)$, $\varepsilon(\rho, z)$ – диэлектрическая проницаемость материала заполняющего волновод, $W = \omega/\omega_0$, ω – рабочая частота, ω_0 – опорная частота, безразмерные величины.

При формулировке *условий излучения* на концах $z = 0$, $z = L$ решение представляется в виде разложения по поперечным сечениям собственных волн E_{0i} или H_{0i} регулярного волновода:

$$E\text{-волны: } B_\psi(\rho, z) = u(\rho, z)/\rho = \sum_i V_i(z) J_1(\nu_{0i}\rho), \quad (1)$$

$$H\text{-волны: } E_\psi(\rho, z) = u(\rho, z)/\rho = \sum_i A_i(z) J_1(\mu_{0i}\rho), \quad (2)$$

причем на регулярных участках $z < 0$, $z > L$ гладко сопряженных с рассматриваемым отрезком нерегулярного волновода $A_i(z) = V_i(z) = a_i^+ e^{-jk_z z} + a_i^- e^{+jk_z z}$.

Условие набегания слева E_{0i} -волн при $z=0$ (при $z < 0$ $a_i^+ \neq 0$):

$$\frac{\partial u(\rho, 0)}{\partial z} = \sum_{i=1}^{m_s} \frac{jk_i}{e_{0i}} \rho J_1(v_{0i}\rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, 0) J_1(v_{0i}\bar{\rho}) d\bar{\rho} - 2j \sum_r k_r a_r^+ \rho J_1(v_{0r}\rho).$$

Условие полного согласования при $z = L$ (при $z > L$ отсутствуют обратные волны $a_i^- = 0$):

$$\frac{\partial u(\rho, L)}{\partial z} = - \sum_{i=1}^{m_s} \frac{jk_i}{e_{0i}} \rho J_1(v_{0i}\rho) \int_0^1 u(\bar{\rho}, L) J_1(v_{0i}\bar{\rho}) d\bar{\rho},$$

где m_s – общее количество собственных волн, распространяющихся

$W > v_{0i}/b$, $k_i = \sqrt{W^2 - (v_{0i}/b)^2}$ и закритических

$W < v_{0i}/b(0)$, $k_i = -j\sqrt{(v_{0i}/b)^2 - W^2}$, используемых при расчете. Аналогичная задача сформулирована в диссертации для H – волн.

В приведенных граничных условиях излучения, в отличие от имеющихся в литературе, наряду с распространяющимися учтены и закритические волны, которые присутствуют вблизи концов нерегулярного участка. Ввиду этого, их можно использовать непосредственно на концах нерегулярного отрезка, что позволяет значительно уменьшить расчетную область особенно вблизи границы полосы прозрачности.

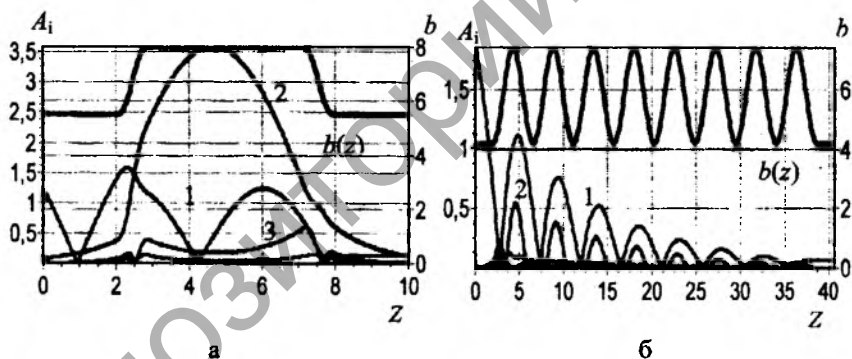
Для решения общего уравнения эллиптического типа на прямоугольной области, в частности, для задач приведенных выше разработан эффективный метод – метод блочной матричной прогонки. Суть этого метода состоит в таком представлении вектора решений конечно-разностной схемы, при котором соответствующая система линейных алгебраических уравнений имеет сильно разреженную матрицу блочно-ленточной структуры. Разработана программная реализация хранения такой матрицы в массиве стеков или в ленточном массиве и решения системы уравнений методом Гаусса с выбором главного элемента на таких структурах данных. За счет использования выбора главного элемента снимаются ограничения на устойчивость, присущие классическим методам прогонки и итерационным методам.

Результаты сравнительных расчетов предложенных алгоритмов, с использованием упаковки матрицы системы в массив стеков и в ленточный массив на примере решения волнового уравнения Гельмгольца в цилиндрической системе координат, показывают, что для рассматриваемой задачи алгоритм с упаковкой в массив стеков работает в 15-30 раз быстрее, чем при упаковке в ленточный массив, ввиду разреженности блочных матриц. А по сравнению с классическим методом Зейделя - в 40 раз [1-А].

Разработанная эффективная методика позволяет рассчитывать и производить синтез устройств СВЧ на основе отрезков нерегулярных волноводов симметричных волн при наличии диэлектрических элементов, в частности –

фильтров в виде канавки определенной конфигурации, диэлектрических диафрагм, рупорных выводов с диэлектрическим окном.

Вторая глава содержит результаты синтеза на основе описанного метода геометрических параметров заградительных фильтров в виде резонансной канавки определенной конфигурации и в виде периодического гофра, обеспечивающих практически полное отражение H_{01} -волны в полосе 3-10% и исследование закономерностей отражения волн в полученных вариантах таких фильтров. Внутренний радиус b_0 фильтра сопряжен с регулярным волноводом, в котором возможно распространение только одной H_{01} волны, т.е. $3.83 < b_0 < 7.016$. Параметры h_k, L_k, Δ_k - высота, ширина и крутизна боковой стенки фильтра в виде трапецевидной канавки с гладкими сопряжениями, h_v, d_v, n_v - высота, период и количество волн фильтра в виде синусоидального гофра подбирались из условия максимума коэффициента отражения $K = 1 - P_s / P_0^+$, где P_s, P_0^+ - мощности проходящей и падающей волн. Все геометрические параметры выражены в единицах $\lambda_0 / (2\pi)$, λ_0 - опорная длина волны. Характерные конфигурации фильтров $b(z)$ и распределение парциальных амплитуд волн (2) возбуждаемого волнового поля при полном заперении представлены на рисунке 1.



а - канавка: $b_0=5.5, L_k=6, h_k=2.5, \Delta_k=0.7$; б - гофры: $b_0=4.21, n_v=8, d_v=4.5, h_v=3.2$
 кривые 1 - $A_1, 2 - A_2, 3 - A_3$

Рисунок 1 - Распределение амплитуд возбуждаемых волн в фильтрах

Если фильтры брегговского типа в виде периодического гофра широко используются и изучались ранее, то заградительные фильтры - рефлекторы в виде одиночной канавки для H волны здесь исследованы впервые.

Расчеты рассматриваемых двух типов фильтров показывают, что для каждого значения радиуса волновода b_0 имеется набор параметров, при которых фильтр практически полностью запирает H_{01} -волну ($K=1$). Полное заперение происходит при условии резонанса на заданной частоте (в выбранных перемен-

ных при $W=1$). Варьируя параметр h_k (h_v) вблизи точки заграждения, можно обеспечить требуемый коэффициент отражения от $K=0$ до $K=1$.

Установлены закономерности изменения параметров рассматриваемых фильтров с изменением радиуса b_0 , при полном запираении H_{01} -волны.

Расчеты резонансной канавки-рефлектора показали, что ее высота h_k всегда такова, что при $W=1$ внутри нее волна H_{02} является распространяющейся и при резонансе ее амплитуда сравнима с амплитудой падающей H_{01} волны. Значимой также является возбуждаемая закритическая волна H_{03} . При уменьшении ширины L_k резонансной канавки ее высота возрастает, и при $L_k \rightarrow 3.8$ становится неприемлемо большой, т.е. $L_k > 3.8$. С увеличением L_k высота h_k стремится к некоторому определенному значению. При $L_k > 5$ реализуется резонанс на H_{02} -моду, при $L_k < 5$ резонанс на H_{01} -моду. При фиксированной крутизне боковой стенки канавки-рефлектора Δ_k ее высота с увеличением b_0 убывает. С увеличением крутизны стенок канавки $\Delta_k \uparrow 1$ ($\Delta_k=1$ прямоугольная канавка) при фиксированной ширине L_k ее высота уменьшается до некоторой предельной величины. При $\Delta_k \rightarrow 0$ ($\Delta_k=0$ квазисинусоидальная канавка) высота h_k становится неприемлемо большой.

Для фильтра в виде гофра характерна следующая особенность: для заданного b_0 находятся при минимальном h_v значения d_v , при которых реализуется коэффициент отражения K близкий к единице (например, $K=0.995$) и ослабление волны распределено на все гофры, как показано на рисунке 1,б. Если теперь зафиксировать найденный период d_v и увеличивать высоту h_v , то наблюдается увеличение K практически до единицы, причем ослабление волны достигается на все меньшем количестве первых гофр. Поэтому при уменьшении количества гофр и соответственно длины фильтра поддержание требуемой величины коэффициента отражения при неизменном b_0 требует пропорционального увеличения высоты гофра. Найденные параметры фильтра изменяются в зависимости от b_0 следующим образом. При удалении от границы полосы прозрачности на участке $\mu_{01} < b_0 < 5$ период монотонно убывает от $d_v=5.7$ до $d_v=4.2$, а требуемая глубина гофра соответственно возрастает от $h_v=1.7$ до $h_v=6.4$. При $b_0 \approx 5$ имеется скачок периода d_v до значения $d_v=5.9$ и на участке $5 < b_0 < \mu_{02}$ величина периода незначительно уменьшается до $d_v=5.4$ при монотонном уменьшении глубины гофра до $h_v=1.6$.

Фильтры в виде канавки имеют довольно узкую полосу отражения (1-5%) на уровне $K \approx 1/\sqrt{2}$. Полоса сужается при уменьшении высоты канавки и возрастании b_0 . Полоса отражения периодического гофрированного фильтра с $n_v=8$ изменяется в пределах 5-12%.

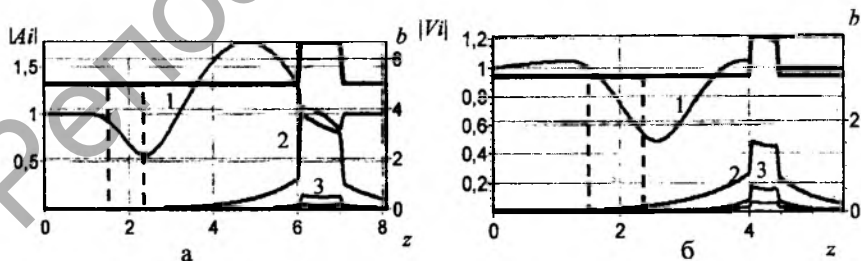
Установленные закономерности отражения волны от канавки-рефлектора позволяют предложить способы компенсации отражения от диэлектрических диафрагм расположенных в волноводе.

Третья глава посвящена исследованию закономерностей физических процессов прохождения симметричных волн через диэлектрическое окно, которое во многих приборах служит для изоляции вакуума, и обоснованию способов компенсации их отражения с помощью нерегулярности в виде канавки или выступа на стенке волновода с круговым сечением.

Установлено, что зависимость коэффициента отражения от толщины диафрагмы имеет периодический характер. Нулевое значение коэффициента отражения соответствует толщине, кратной половине длины волны в волноводе, заполненном диэлектриком, максимальное значение сдвинуто на четверть длины волны. «Неотражающая» диафрагма «работает» как полуволновой резонатор, образованный границами диэлектрика, внутри нее наблюдается резонанс основной волны, при этом высшие критические волны не возбуждаются. При невыполнении условия резонанса даже для небольших $\varepsilon \approx 2.5$ коэффициент отражения может достигать 90%, поэтому актуальным является поиск и обоснование способов компенсации отражения.

Предложены два способа компенсации отражения симметричных волн круглого волновода от «отражающего» (нерезонансного) диэлектрического окна с помощью канавки-рефлектора или выступа на стенке волновода и выполнен синтез параметров компенсаторов с требуемыми свойствами.

При первом способе компенсации канавка-рефлектор, располагается на определенном расстоянии от диэлектрического окна заданной толщины и параметры подбираются таким образом, чтобы система «диафрагма-рефлектор» образовала полуволновой резонатор. Установлено, что при выполнении условия резонанса коэффициент отражения рабочей H_{01} или E_{01} -волны уменьшается практически до нуля. На рисунке 2 представлены конфигурация компенсаторов и амплитуды возбуждаемых волн при полном прохождении основной волны. Пунктиром отмечено положение диэлектрического окна.



1, 2, 3 – амплитуды возбуждаемых мод; $\Delta_k = 0,8$, $D_\varepsilon = 1$, $\varepsilon = 2$:

а) H волны $b_0 = 5$, $h_k = 1,68$, $L_k = 1,1$; б) E волны $b_0 = 3$, $h_k = 0,89$, $L_k = 0,49$

Рисунок 2 – Положение диэлектрика и канавки при полной компенсации

Расчет показал, что в этом случае коэффициент отражения рефлектора равен коэффициенту отражения от диафрагмы, а расстояние между диафрагмой и рефлектором близко к половине длины волны пустого волновода. Полоса

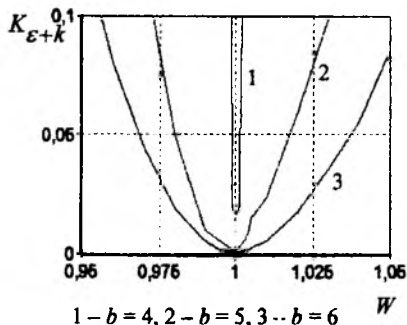


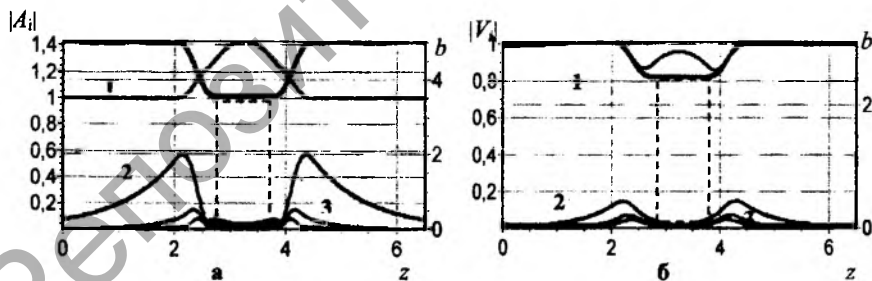
Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отражения H -волны от частоты

прозрачности такого компенсатора (рисунок 3) возрастает от 1% вблизи границы запираения основной волны волновода до 5% вблизи границы открытия волны H_{02} (E_{02}).

В некоторых ситуациях компенсирующий рефлектор отстоящий от диафрагмы нежелателен из-за увеличения размеров компенсационной системы. Поэтому был предложен второй способ компенсации отражения, при котором диэлектрическое окно совмещено с выступом, либо с канавкой волновода. В

этом случае диэлектрик находится внутри самого рефлектора и подбором его параметров во многих ситуациях удастся достичь того же эффекта компенсации. На рисунке 4 представлены конфигурация компенсаторов с выступом и амплитуды возбуждаемых волн при полном прохождении основной волны.

В компенсаторе с выступом за счет уменьшения радиуса диэлектрического окна хотя и происходит частичное выравнивание волновых сопротивлений в диэлектрике и вакууме, однако компенсация отражения в основном происходит



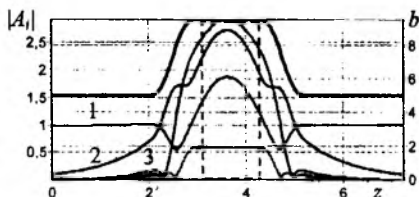
1, 2, 3 – амплитуды возбуждаемых мод; $\Delta_k = 0,4$, $D_s=1$, $\epsilon=2$:

а) H волны: $b=5$, $h_k=1,5$; б) E волны: $b=3$, $h_k=0,55$

Рисунок 4 – Амплитуды возбуждаемых волн в компенсаторе с выступом

за счет резонансных эффектов на боковых границах выступа. Как видно из рисунка в области боковых стенок наблюдается значительное увеличение амплитуд высших закрытых волн. Как показали детальные расчеты параметров компенсатора для различных толщины и диэлектрической проницаемости с

увеличением крутизны боковых стенок Δ_k от 0.4 до 0.8 высота выступа компенсатора уменьшается, практически по линейному закону примерно на 0.7 единиц, т.е. темп уменьшения не зависит от толщины и диэлектрической проницаемости. При увеличении радиуса волновода b_0 от 4 до 7 высота выступа возрастает почти линейно, причем темп возрастания меньший у более толстой диафрагмы и меньшем ϵ . Полоса пропускания такого компенсатора на уровне $K=0.025$ составляет 7-15%.

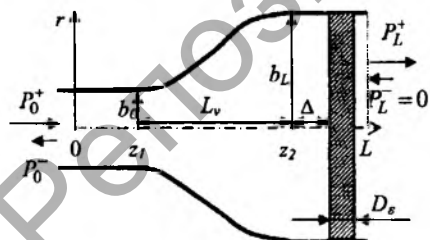


1, 2, 3 – амплитуды возбуждаемых мод;
 $b_0=5$, $\Delta_k=0.4$, $D_\epsilon=1.3$, $\epsilon=2$, $h_k=4.5$

**Рисунок 5 – Прохождение H волны
 через канавку с диафрагмой**

Рисунки 2 и 5 показывают, что при увеличении h_k вначале наблюдается резонанс, при котором реализуется полное отражение волны, затем при дальнейшем небольшом увеличении h_k наступает резонанс соответствующий полному прохождению. Как видно из сравнения рисунков 2 и 5 картины возбуждаемых волн при этих резонансах сильно различаются.

Четвертая глава посвящена исследованию физических особенностей отражения симметричных волн от диэлектрической диафрагмы на апертуре рупора. Рупор обычно используется при выводе СВЧ энергии из генератора, обеспечивая его согласование с открытым



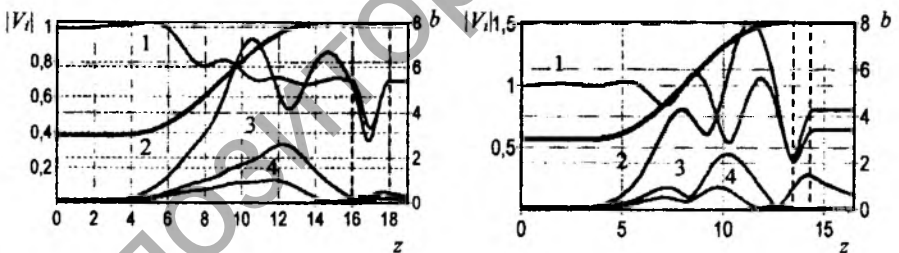
**Рисунок 6 – Рупор
 с диэлектрической диафрагмой**

пространством, при этом на апертуре рупора помещается либо изолирующая вакуумное пространство генератора диэлектрическая диафрагма, либо слой диэлектрического нагреваемого материала при его СВЧ обработке (рисунок 6). Помещение диэлектрического материала в раскрыве рупора приводит к нежелательному эффекту отражения СВЧ волны, которое может быть значи-

тельным. На основе предложенного в главе 1 метода выполнено детальное исследование закономерностей прохождения волн в таком рупоре и найдены условия, при которых отражение может быть компенсировано.

Детальные исследования были выполнены для рупоров симметричных H и E волн с входным радиусом b_0 , соответствующим примерно середине полосы прохождения только основной волны ($b_0=5$ для H и $b_0=3$ для E), выходным радиусом $b_L \approx (2+3)b_0$ и длиной $L_v \approx (3+5)b_0$. Для таких геометрических размеров в рупоре с «гладким» монотонным параболическим профилем $b(z) = b_0 + (b_L - b_0) \cdot P_3[(z - z_1)/(z_2 - z_1)]$; $P_3[T] = T^3(10 - 15T + 6T^2)$; $0 \leq T \leq 1$ коэффициент отражения K не превосходит 0.0023 и на выходе рупора величина амплитуд второй и третьей парциальных волн составляет $\approx 85 \div 95\%$ и $\approx 4 \div 15\%$ от амплитуды основной волны.

Расчеты показали, что при помещении «прозрачной» для основной волны диафрагмы в раскрытие рупора происходит небольшое, примерно в два раза увеличение коэффициента отражения K , объясняемое отражением от диафрагмы возбуждаемых в рупоре волн с более высоким индексом. Естественно, что при помещении в раскрыв рупора «отражающей» диафрагмы коэффициент отражения рупора примерно в полтора раза меньше, чем коэффициент отражения от диафрагмы. При оптимизации параметров b_L , L_v и Δ удается уменьшить коэффициент отражения до значений соответствующих рупору без диэлектрического окна и в некоторых случаях практически до нуля, причем, если отражение от диафрагмы небольшое, то это удастся сделать за счет отстройки только параметра Δ . На рисунке 7 представлено распределение амплитуд возбуждаемых парциальных E -волн.



а) $L_v=12$; $\Delta=1,01$; $K=0,0008$; $D_\epsilon=2$;

б) $L_v=10,5$; $\Delta=0$; $K=0,00047$; $D_\epsilon=1$;

$b_0=3$; $b_L=8$; $z_1=3$; $\epsilon=2,5$; 1...4 - амплитуды V_1, \dots, V_4

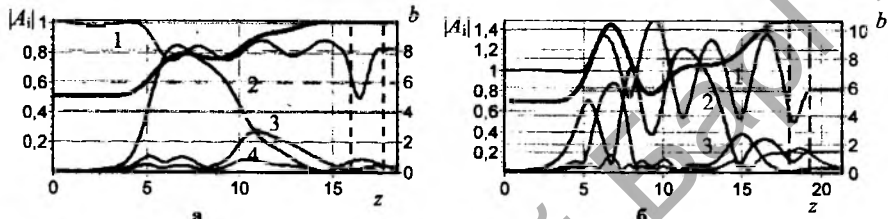
а) «прозрачная» и б) «отражающая» диэлектрическая диафрагма

Рисунок 7 – Рупор для вывода E -волн с монотонным профилем

При наличии отражения перед диафрагмой на амплитудных кривых видны характерные для суперпозиции прямой и обратной волн биения. После диафрагмы амплитуды проходящей волны постоянны, что соответствует полному согласованию. В рупоре с оптимальными параметрами происходит переотражение волн между диафрагмой и нерегулярным участком волновода. В результате

система «рупор-диафрагма» представляет полуволновой трансформатор, через который волна проходит без отражения.

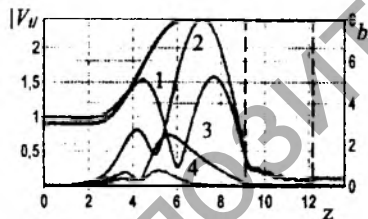
Установлено, что за счет использования немонотонного гофрированного профиля можно обеспечить кроме малого отражения еще и отсутствие высших мод в раскрыве рупора E или H - волн. Введение «прозрачного» окна практически не изменяет свойств такого рупора ввиду отсутствия в области диафрагмы высших мод. Однако компенсация влияния «отражающего» диэлектрического окна в таком рупоре возможна лишь за счет значительной неоднородности профиля, либо за счет введения рефлектора, как это видно из рисунка 8,б. Картина процессов в рупоре E -волн аналогична, представленной на рисунке 8.



а) $b_L=9,90, L_v=12,38, K=0,0026;$ б) $b_L=10,67, L_v=15,3, K=0,0023;$
 $b_0=5, z_1=3, \epsilon=2,5;$ 1...4 - амплитуды волн H_{01}, \dots, H_{04}
 а) «прозрачная» и б) отражающая диэлектрическая диафрагма

Рисунок 8 – Рупор для вывода H -волн с немонотонным профилем

При падении волны на «толстую» диафрагму из поглощающего диэлектрического материала с большим значением мнимой части диэлектрической проницаемости ϵ'' , волна затухает, не доходя до задней стенки и основную роль играет отражение от передней стенки диафрагмы. Расчеты для симметричной E -волны в регулярном волноводе показали, что коэффициент отражения в этом случае может быть значительным, что например существенно увеличивает затраты на СВЧ обработку. Выполненное исследование указывает на то, что использование рупора с подобранными оптимальным образом параметрами позволяет практически полностью компенсировать отражение от поглощающей диэлектрической диафрагмы. На рисунке 9 представлено распределение амплитуд в таком оптимально подобранном рупоре.



$b_L=8; L_v=4,58; \Delta=2,71; K=0,0004;$
 $b_0=3; z_1=2; D_\epsilon=3; \epsilon=36-6j$

Рисунок 9 – Рупор E -волн с диафрагмой из поглощающего материала

В приложении приведены результаты тестирования предложенного в главе 1 метода блочной матричной прогонки при решении задач Гельмгольца и

двумерного уравнения теплопроводности с конвективным членом, акт внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана эффективная методика решения задачи возбуждения симметричных H и E волн в отрезке нерегулярного волновода, заполненного неоднородным диэлектриком, основанная на преобразовании координат, отображающем продольно-нерегулярный круглый волновод в цилиндр единичного радиуса, получении скалярной краевой задачи в преобразованной системе и предложенного прямого сеточного метода блочной матричной прогонки решения полученного эллиптического уравнения, полезно использующего регулярность границ расчетной области в преобразованной системе. Суть метода блочной матричной прогонки состоит в таком представлении вектора решений конечно-разностной схемы, при котором соответствующая система линейных алгебраических уравнений имеет сильно разреженную матрицу блочно-ленточной структуры. Разработана программная реализация хранения такой матрицы в массиве из стеков или в ленточном массиве и решения системы уравнений методом Гаусса с выбором главного элемента на таких структурах данных. За счет использования выбора главного элемента снимаются ограничения на устойчивость, присущие классическим методам прогонки и итерационным методам. Быстродействие разработанной компьютерной программы и сокращение объема требуемой оперативной памяти достигается выбором структур данных и оптимизации кода программы. Установлено, что алгоритм с упаковкой в массив стеков работает в 15-30 раз быстрее, чем ленточный массив, а по сравнению с методом Зейделя - в 40 раз [1-А, 8-А, 9-А-12-А, 15-А, 16-А, 20-А, 26-А].

2. На основе разработанной методики выполнен синтез геометрических параметров узкополосных заградительных фильтров H_{01} – волны в виде резонансной канавки-рефлектора определенной конфигурации и в виде синусоидального гофра, обеспечивающих практически полное отражение на заданной частоте. Исследованы особенности отражения волн и полосовые характеристики полученных вариантов таких фильтров, а также установлены закономерности изменения их параметров с изменением радиуса волновода. Канавка-рефлектор характерна тем, что для фиксированной ширины находится ее высота, при которой реализуется условие полного отражения, при этом в ней H_{02} волна является открытой и ее амплитуда сравнима с амплитудой основной волны. Ширина канавки не может быть меньше, чем критический для H_{01} волны радиус волновода. При ширине канавки ($3.8 < L_k < 5$) реализуется резонанс на основной моде, при ($5 < L_k < 6$) на моде H_{02} , полоса запираения составляет 1-5%. При полном запираении период фильтра в виде гофра изменяется в диапазоне

(4.3÷5.8). Высота гофра такова, что внутри волны гофра, при радиусах волновода $4.5 < b_0 < 7$ волна H_{02} распространяющаяся, при $4 < b_0 < 4.5$ закритическая. Полоса запираения в зависимости от b_0 изменяется в пределах 5-12% [2-А, 11-А, 14-А].

3. Установлено, что коэффициент отражения симметричных волн круглого волновода от «нерезонансного» диэлектрического окна даже для небольших ≈ 2.5 может достигать 80%. Предложены два способа компенсации отражения с помощью канавки-рефлектора (выступа) либо отстоящей на определенном расстоянии, либо совмещенной с диэлектрическим окном и выполнен синтез параметров компенсаторов с требуемыми свойствами. При первом способе компенсации канавка-рефлектор, располагается на определенном расстоянии от диэлектрического окна заданной толщины и параметры подбираются таким образом, чтобы система «диафрагма-рефлектор» образовала полуволновой резонатор. Установлено, что при выполнении условия резонанса коэффициент отражения рабочей H_{01} или E_{01} -волны уменьшается практически до нуля. Полоса прозрачности такого компенсатора 1-5%. При втором способе компенсации диэлектрическое окно совмещено с выступом, либо с канавкой волновода. В этом случае диэлектрик находится внутри самого рефлектора и подбором его параметров удастся достичь того же эффекта компенсации. Для компенсатора в виде выступа удастся уменьшить высоту выступа за счет выравнивания волнового сопротивления в диэлектрике и вакууме, при которых происходит эффективная компенсация отражения [3-А, 4-А, 7-А, 13-А, 17-А–19-А, 21-А–23-А].

4. Установлены особенности прохождения и отражения симметричных H и E волн в рупоре кругового сечения при помещении в его раскрыве диэлектрической диафрагмы с различными толщиной, диэлектрической проницаемостью и поглощающей способностью. При помещении непрозрачной диафрагмы в раскрыве рупора с отношением $b_1/b_0 \sim 2$ его коэффициент отражения в полтора раза меньше, чем коэффициент отражения диафрагмы в регулярном волноводе. Найдены параметры рупора с монотонным и гофрированным профилем, при которых обеспечивается полная компенсация отражения от диэлектрической не поглощающей диафрагмы, а в немонотонном рупоре обеспечивается подавление высших волн на апертуре за счет эффекта переотражения волн в системе рупор-диафрагма. При небольших значениях коэффициента отражения от диафрагмы компенсация может быть достигнута за счет ее смещения от края апертуры. Расчеты так же показали, что использование рупора с подобранными оптимальным образом параметрами позволяет практически полностью компенсировать отражение от поглощающей диафрагмы в широком диапазоне значений диэлектрической проницаемости [5-А, 6-А, 24-А, 25-А, 27-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Предложенный метод блочной матричной прогонки и эффективный алгоритм решения задачи о прохождении симметричных волн в продольно-нерегулярном волноводе позволяет успешно производить синтез СВЧ устройств с диэлектрическими включениями.

Результаты численного моделирования фильтров и диэлектрических окон, полученные в работе, могут быть использованы в научных и производственных организациях, занимающихся разработкой и исследованиями устройств СВЧ техники.

Полученные результаты о возможности компенсации отражения волн от диэлектрической поглощающей диафрагмы с помощью выбора соответствующих параметров рупора представляют несомненный практический интерес при разработке технологий СВЧ обработки материалов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1-А. Наранович, О.И. Решение двумерного уравнения эллиптического типа методом блочной матричной прогонки / О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2007. – № 3 (19). – С. 18–23.

2-А. Наранович, О.И. Численное моделирование фильтров симметричных H_{01} -волн методом блочной матричной прогонки / О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 10. – С. 57–63.

3-А. Кураев, А.А. Согласование диэлектрической диафрагмы в круглом волноводе на моде H_{01} с помощью канавки-рефлектора / А.А. Кураев, О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2008. – № 3 (33). – С. 59–65.

4-А. Кураев, А.А. Компенсация отражения H_{01} -волны круглого волновода от диэлектрического окна / А.А. Кураев, О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2009. – № 6 (44). – С. 5–10.

5-А. Наранович, О.И. Компенсация отражения H_{01} -волны от диэлектрического окна на апертуре рупора / О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2010. – № 3 (49). – С. 24–29.

6-А. Наранович, О.И. Компенсация отражения симметричных E волн от диэлектрического материала в раскрыве рупора / О.И. Наранович, А.К. Сеницын // Доклады БГУИР. – 2010. – № 8 (54). – С. 13–19.

Статьи в других научных изданиях

7-А. Кураев, А.А. Расчет параметров диэлектрической диафрагмы круглого волновода, не отражающей H_{01} -волну / А.А. Кураев, О.И. Наранович, А.К. Силицын // Техника и приборы СВЧ. – 2008. – № 1. – С. 10–15.

Материалы конференций

8-А. Наранович, О.И. Исследование методов решения краевой задачи для системы ОДУ второго порядка / О.И. Наранович // Сб. материалов междунаучно-практической конференции «Современная Радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров». – Мн.: МГВРК, 2006. – С. 38–40.

9-А. Лыженков, Т.В. Разработка проекта для решения двумерного уравнения Пуассона / Т.В. Лыженков, О.И. Наранович // Содружество наук. Барановичи-2006: материалы науч.-практ. студ. конф., Барановичи, 27 апреля 2006 г. / редкол.: В.В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи: БарГУ, 2006. – С. 103–105.

10-А. Наранович, О.И. Программная реализация решения двумерного уравнения эллиптического типа методом блочной матричной прогонки на стеках / О.И. Наранович, А.К. Силицын // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»: Материалы 3-ей междунар. молодежной науч.-техн. конф., 16–21 апреля 2007 г. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2007. – С. 306.

11-А. Наранович, О.И. Исследование геометрических характеристик фильтров симметричных H_{01} -волн / О.И. Наранович, А.К. Силицын // 17-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2007). Севастополь, 10–14 сентября 2007 г.: Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2007. – Т. 1. – С. 135–136.

12-А. Наранович, О.И. Оптимизация кода компьютерной программы для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений / О.И. Наранович // Техника и технологии: инновации и качество [Текст]: материалы Междунар. Науч.-практ. конф., 23–24 ноября 2007 г., Респ. Беларусь / редкол.: В. В. Таруц (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи: РИО БарГУ, 2007. – С. 270–272.

13-А. Наранович, О.И. Метод расчета параметров продольно-нерегулярного волновода с диэлектрическим окном / О.И. Наранович, А.К. Силицын // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2008»: Материалы 4-ой междунар. молодежной науч.-техн. конф., 21–25 апреля 2008 г. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2008. – С. 306.

14-А. Naranovich, O.I. Research of dependence of a reflectivity by of symmetrical H_{01} -waves on geometrical parameters of filters in a hollow irregular waveguide / O.I. Naranovich, A.K. Sinitsyn // IVEC 2008, Monterey, USA, April 22–24, 2008 – P. 362–363.

15-А. Казак, Ю.И. Модификация алгоритма решения дифференциального уравнения в среде C++ Builder с использованием стеков / Ю.И. Казак, О.И. Наранович // Содружество наук. Барановичи-2008 [Текст] : материалы IV Междунар. науч.-практ. студ. конф., 21 мая 2008 г., Барановичи, Респ. Беларусь : в 2 ч. / редкол. : В.Н. Зуев (гл. ред.), В.В. Таруц. – Барановичи : РИО БарГУ, 2008. – Ч. 1. – С. 34–35.

16-А. Наранович, О.И. Представление решения уравнения Пуассона с помощью построения линий уровня / О.И. Наранович, Д.В. Шмат // Содружество наук. Барановичи-2008 [Текст] : материалы IV Междунар. науч.-практ. студ. конф., 21 мая 2008 г., Барановичи, Респ. Беларусь : в 2 ч. / редкол. : В.Н. Зуев (гл. ред.), В.В. Таруц. – Барановичи : РИО БарГУ, 2008. – Ч. 1. – С. 48–49.

17-А. Кураев, А.А. Расчет коэффициента отражения H_{01} -волны круглого волновода от диэлектрического окна с компенсирующей канавкой / А.А. Кураев, О.И. Наранович, А.К. Синицын // 18-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2008), Севастополь, 8–12 сентября 2008 г.: Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2008. – С. 165–166.

18-А. Наранович, О.И. Использование метода блочной матричной прогонки для решения эллиптических уравнений / О.И. Наранович, А.К. Синицын // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2009»: Материалы 5-ой междунар. молодежной науч.-техн. конф., 20–25 апреля 2009 г. – Севастополь: изд-во СевНТУ, 2009. – С. 331.

19-А. Naranovich, O.I. Calculation of reflection factor H_{01} -waves of a round waveguide from a dielectric window with a compensating groove / O.I. Naranovich, A.K. Sinitsyn // IVEC 2009, Rome, Italy, April 28–30, 2009. – P. 143–144.

20-А. Наранович, О.И. Визуализация решения дифференциального уравнения в частных производных / О.И. Наранович, Д.В. Шмат, Ю.И. Казак // Содружество наук. Барановичи-2009 [Текст] материалы V Междунар. науч.-практ. конф. молодых исследователей, 21–22 мая 2009 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол. : В.Н. Зуев (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи : РИО БарГУ, 2009. – С. 85–86.

21-А. Наранович, О.И. Метод блочной матричной прогонки и его использование при решении волноводных задач / О.И. Наранович, А.К. Синицын // Международная научно-практическая конференция «Веб-программирование и Интернет-технологии WebConf09»: Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. Минск, 8–10 июня 2009 г. – Мн.: Институт математики НАН Беларуси, 2009. – С. 52–54.

22-А. Наранович, О.И. Использование метода блочной матричной прогонки для решения двумерных уравнений математической физики / О.И. Наранович // Наука. Образование. Технологии–2009 [текст]: материалы II Междуна-

родной научно-практической конференции, 10–11 сентября 2009 г., Барановичи, Республика Беларусь: в 2ч. / редкол.: В.И. Кочурко (гл. ред.) [и др.]. – Барановичи: РИО БарГУ, 2009. – Ч.2 – С. 47–48.

23-А. Кураев, А.А. Расчет устройства компенсации отражения H_{01} -волны круглого волновода от диэлектрического окна / А.А. Кураев, О.И. Наранович, А.К. Синицын // 19-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2009). Севастополь, 14–18 сентября 2009 г.: Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2009. – С. 137–138.

24-А. Naranovich, O.I. Compensation of wave H_{01} reflection from a dielectric window on to the horn aperture / O.I. Naranovich, A.K. Sinitsyn // IVEC 2010, Monterey, USA, May 18–21, 2010 – P. 473–474.

25-А. Наранович, О.И. Компенсация отражения E_{01} волны от диэлектрического окна на апертуре рупора / О.И. Наранович, А.К. Синицын // 20-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2010). Севастополь, 13–17 сентября 2010 г.: Материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2010. – С.137–138.

26-А. Наранович, О.И. Способы решения эллиптического уравнения в среде Matlab / О.И. Наранович // Наука. Образование. Технологии-2010 [Текст] : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., 21-22 окт. 2010 г., Барановичи, Респ. Беларусь / редкол.: А. В. Никишова (гл. ред.) [и др.]. - Барановичи : РИО БарГУ, 2010. - С. 123-125.

27-А. Naranovich, O.I. Compensation of wave E_{01} reflection from a dielectric window on to the horn aperture / O.I. Naranovich, A.K. Sinitsyn // IVEC 2011, Bangalore, India, February 21–24, 2011 – P. 393–394.



Нарановіч Аксана Іванаўна

Тэорыя і метады разліку прыладаў ЗВЧ на нерэгулярных хваляводах з дыэлектрычнымі ўключэннямі

Ключавыя словы: нерэгулярны хвалявод, прылады ЗВЧ, сіметрычныя хвалі, дыэлектрычныя ўключэнні, аптымізацыя профілю, хваляводны фільтр, рупар.

Мэта работы: распрацоўка эфектыўнай метадыцы рашэння краёвай задачы аб распаўсюджванні сіметрычных хваль ў падоўжна-нерэгулярным адрэзку хвалявода кругавога сячэння з неаднародным дыэлектрычным запаўненнем і яе прыкладанне да сінтэзу і даследавання характарыстык прыладаў ЗВЧ на адрэзках нерэгулярнага хвалявода - фільтраў, дыэлектрычных вокнаў і рупараў.

Аб'ект даследавання: падоўжна-нерэгулярныя хваляводы кругавога папярэчнага сячэння з неаднародным дыэлектрычным запаўненнем і рабочымі тыпамі мод H_{0i} або E_{0i} .

Прадмет даследавання: метадыка рашэння краёвых задач для нерэгулярных хваляводаў з неаднародным дыэлектрычным запаўненнем на H_{0i} і E_{0i} модах.

Метады даследавання: метады пераўтварэння каардынат, сеткавы метады, метады блочнай матрычнай прагонкі рашэння краёвай задачы для двумернага эліптычнага ўраўнення, метады прамых для пабудовы канчаткова-рознасных схем, парцыяльныя гранічныя ўмовы, метады Гаўса, метады Зейдзеля, метады Нэлдара і Міда для аптымізацыі параметраў профілю хвалявода і рупара.

Вынікі даследавання. Распрацавана эфектыўная метадыка рашэння краёвай задачы для эліптычнага ўраўнення агульнага віду на рэгулярнай вобласці, да якой метадам пераўтварэння каардынат зводзіцца задача аб распаўсюджванні сіметрычных хваль у круглых нерэгулярных хваляводах. На аснове распрацаванага металу выкананы сінтэз засланяючых фільтраў H - хваль у выглядзе канаўкі і адрэзкаў перыядычных гофр і праведзена даследаванне паласавых уласцівасцяў атрыманых фільтраў. Выяўлены заканамернасці праходжання сіметрычных хваль праз дыэлектрычныя вокны і распрацаваны два спосабы кампенсацыі іх адлюстравання. Устаноўлены параметры кампенсатараў адлюстравання ад дыэлектрычных дыяфрагм у выглядзе нерэгулярнасьці сценкі хвалявода адлеглай або спалучанай з дыэлектрычнай дыяфрагмай. Устаноўлены асаблівасці праходжання і адлюстравання сіметрычных H_{01} і E_{01} хваль у рупары кругавога сячэння з дыэлектрычнай дыяфрагмай ў яго раскрыце. Атрыманы параметры такога рупара, пры якіх кампенсуецца адлюстраванне ад дыэлектрычнай дыяфрагмы.

SUMMARY

Aksana Ivanovna Naranovich

Theory and calculation methods for MICROWAVE devices on irregular waveguides with dielectric inclusions

Keywords: irregular waveguide, microwave devices, symmetric waves, dielectric inserts, profile optimization, waveguide filter, horn.

Primary purpose of research: an efficient method for solving boundary value problem of symmetric waves in longitudinally-within a waveguide of circular section with varied dielectric filling and its application to the synthesis and study of characteristics of MICROWAVE devices on the bars of irregular waveguide filters, dielectric windows and horns.

Object of research: longitudinally-irregular waveguide of circular cross-section with mixed dielectric filling and fashion types H_{0i} or E_{0i} .

Subject of research: methods of solution of boundary value problems for irregular waveguides with mixed dielectric filling at H_{0i} and E_{0i} modes.

Research methods: the coordinate transformation method, grid-based method, method of block matrix run for the solution of boundary value problems for two-dimensional elliptic equation, method of lines for construction of mesh schemes, partial boundary conditions, Gauss method, Zeidel method, Nelder and Mead method for the parameter optimization of waveguide and horn profile.

Results are obtained. Developed an effective method for solving boundary problems for elliptic equation common to regular area to which the method of conversion of coordinates is the task of distributing symmetric waves in irregular waveguides. On basis of developed method the synthesis of block filter H -waves in the form of periodic corrugation grooves and bars has been made and the study of band-pass property of obtained filters has been described. The patterns of symmetric waves passage through the dielectric window have been identified and two ways of compensation of their reflection have been developed. The options of reflection compensators from dielectric diaphragms as irregular waveguide wall with or apart from dielectric diaphragm have been specified. The features of passage and reflection of symmetric H_{01} and E_{01} waves in a circular cross-section dielectric horn with dielectric diaphragm at the aperture have been specified. The options of this horn have been received where by the reflection of dielectric diaphragm have been compensated.

РЕЗЮМЕ

Наранович Оксана Ивановна

Теория и методы расчета устройств СВЧ на нерегулярных волноводах с диэлектрическими включениями

Ключевые слова: нерегулярный волновод, устройства СВЧ, симметричные волны, диэлектрические включения, оптимизация профиля, волноводный фильтр, рупор.

Цель работы: создание эффективной методики решения краевой задачи о распространении симметричных волн в продольно-нерегулярном отрезке волновода кругового сечения с неоднородным диэлектрическим заполнением и ее приложение к синтезу и исследованию характеристик устройств СВЧ на отрезках нерегулярного волновода - фильтров, диэлектрических окон и рупоров.

Объект исследования: продольно-нерегулярные волноводы кругового поперечного сечения с неоднородным диэлектрическим заполнением и рабочими типами мод H_{0i} или E_{0i} .

Предмет исследования: методика решения краевых задач для нерегулярных волноводов с неоднородным диэлектрическим заполнением на H_{0i} и E_{0i} модах.

Методы исследования: метод преобразования координат, сеточный метод, метод блочной матричной прогонки решения краевой задачи для двумерного эллиптического уравнения, метод прямых для построения конечно-разностных схем, парциальные граничные условия, метод Гаусса, метод Зейделя, метод Нелдора и Мида для оптимизации параметров профиля волновода и рупора.

Полученные результаты. Разработана эффективная методика решения краевой задачи для эллиптического уравнения общего вида на регулярной области, к которой методом преобразования координат сводится задача о распространении симметричных волн в круглых нерегулярных волноводах. На основе разработанного метода выполнен синтез заграждающих фильтров H – волн в виде канавки и отрезков периодических гофр и проведено исследование полосовых свойств полученных фильтров. Выявлены закономерности прохождения симметричных волн через диэлектрические окна и разработаны два способа компенсации их отражения. Установлены параметры компенсаторов отражения от диэлектрических диафрагм в виде нерегулярности стенки волновода отстоящей или совмещенной с диэлектрической диафрагмой. Установлены особенности прохождения и отражения симметричных H_{01} и E_{01} волн в рупоре кругового сечения с диэлектрической диафрагмой в его раскрыве. Получены параметры такого рупора, при которых компенсируется отражение от диэлектрической диафрагмы.

Научное издание

НАРАНОВИЧ Оксана Ивановна

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА УСТРОЙСТВ СВЧ НА
НЕРЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДАХ С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ
ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности
01.04.03 - Радиопизика

Подписано в печать 07.07.2011.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 526.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П.Бровки,6