

*На правах рукописи*

**РГБ 04**

- 9 007 2960

**ТЕМНОВ Владимир Матвеевич**

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
ЧАСТИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА  
СТРУКТУР СВЧ и КВЧ ДИАПАЗОНОВ**

**Специальность 05.12.21 — радиотехнические системы  
специального назначения, включая технику СВЧ  
и технологию их производства**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Нижний Новгород  
2000

Работа выполнена в Нижегородском государственном  
техническом университете

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук, профессор **В.А. Неганов**, г. Самара, ПГАТИ,  
доктор технических наук, профессор **Ю.А. Отмахов**, г. Н. Новгород, НГСХА,  
доктор технических наук, с.н.с. **Р.К. Стародубровский**, г. Н. Новгород,  
ННИПИ.

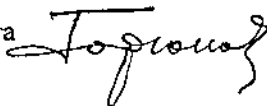
Ведущая организация — Государственное унитарное предприятие  
"Правдинское конструкторское бюро", Нижегородская область

Защита состоится 26 июня 2000 г. в 15 часов на заседании специа-  
лизованного совета Д 063.85.06 в Нижегородском государственном  
техническом университете по адресу: 603600, г. Н. Новгород, ГСП-  
41, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НГТУ

Автореферат разослан 23 мая 2000 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
канд. техн. наук, доцент



М.В. Горюнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современная прикладная электродинамика, связанная с постановкой и решением макроскопических краевых задач для уравнений Максвелла, находится в настоящее время на одном из этапов своего развития. Он характеризуется широким использованием вычислительной техники, в частности, персональных компьютеров, что означает продолжение начавшейся несколько десятилетий назад эры машинного проектирования СВЧ устройств. Следует отметить, что направление машинного проектирования обязано своим возникновением не только развитию вычислительной техники, но также и прикладной математики. Действительно, вопросы обоснования сходимости приближенных решений к истинному, уменьшение влияния ошибок округления, некорректные задачи и др., находят свое разрешение в машинных алгоритмах лишь в той степени, в какой развиты соответствующие фундаментальные разделы математики. С другой стороны, как и всякое активно развивающееся направление, машинное проектирование диктует свои специфические требования к машинно реализуемым алгоритмам и, следовательно, представляет собой хорошую основу для появления новых, свойственных этому направлению методов и алгоритмов решения задач.

В системах машинного проектирования главенствующую роль играет математическое обеспечение. От полноты и разнообразия математического обеспечения зависит построение оптимальных вычислительных процессов для расчета конкретных СВЧ, КВЧ, субмиллиметровых и других устройств.

В многоуровневых системах проектирования должны быть представлены простые алгоритмы, использующие теорию длинных линий, алгоритмы на основе традиционных аналитических (или полуаналитических) методов решения граничных задач [Л.1], а также численные методы, обладающие большой универсальностью [Л.2].

Особое место среди методов решения электродинамических задач занимает метод частичных областей (МЧО), являющийся по существу, численно-аналитическим методом. МЧО называют методом сшивания [Л.3], методом моментов [Л.4], иногда методом Трэфтца [Л.5]. Он является одним из старейших методов решения задач электродинамики и применяется при решении многих классических задач: о падении плоской волны на плоскую границу магнито-диэлектрических сред, о распространении волны в плоском и круглом диэлектрических волноводах, о скин-эффекте в проводнике с гладкой поверхностью, о структуре электромагнитных полей и т.п. [Л.6–Л.10]. При его использовании решено также громадное количество более сложных задач и можно ожидать, что в дальнейшем их число будет постоянно увеличиваться. Для такого оптимизма существуют обоснованные причины. Главная из них заключается в том, что МЧО занимает промежуточное положение между аналитическими и численными методами. С его помощью решаются такие задачи, которые нельзя решить аналитическими методами и чрезвычайно трудно решить численными методами [Л.11, Л.12]. Другой важной причиной является возможность развития МЧО на случай дифракционных задач с некоординатными границами. В настоящее время такие задачи эффективно решаются неполным методом Галеркина [Л.13, Л.14] и методом поперечных сечений [Л.15]. Наконец, еще одной причиной можно считать использование МЧО для решения задач о полосковых нерегулярностях [Л.16] и полосковых линиях передачи [Л.17]. Здесь возможности метода раскрыты далеко не полностью.

Зачастую бывает сложно провести грань между МЧО и другими известными методами по той причине, что разбиение рассматриваемой структуры на частичные области производится в подавляющем числе случаев. Решение в выделенных частичных областях (ЧО) ищется, как правило, в виде рядов или интегралов от функций с разделяющимися переменными, почленно удовлетворяющими волновому уравнению. В дальнейшем процедура построения решения сводится к наложению на искомое решение граничных условий или условий непрерывности на общих границах соприкасающихся областей. Получающиеся в результате функциональные уравнения сводятся тем или иным способом к системам линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов разложений. И в зависимости от способа сведения к СЛАУ проистекает название метода; например, метод обращения матричного или интегрального оператора [Л.17, Л.18] или модифицированный метод вычетов [Л.3] и т.п.

Бывают ситуации, когда преобразованию к новой СЛАУ трудно придумать название. Например, при введении в вырожденной области на границах ЧО новой системы функций, учитывающей особенности на ребре [Л.19]. Здесь название метода остается прежним: МЧО с учетом особенностей на ребре.

Таким образом, МЧО лежит в основе всех методов, в которых решение для полей в частичных областях отыскивается указанным выше способом.

Задачами, для решения которых наиболее часто используется МЧО, являются задачи о скачкообразных нерегулярностях в волноводах. Теоретическим фундаментом для решения задач этого типа служит классическая работа [Л.20], в которой доказана полнота системы  $TE$  и  $TM$  волн для волновода произвольной формы.

Попытка дать обоснование МЧО для ступенчатого соединения волноводов разных сечений была предпринята в [Л.21], однако в этой работе не была установлена сходимость метода при наличии максимально острых ребер и не раскрыта природа сходимости МЧО.

Начало широкому применению МЧО в практических расчетах было положено работой [Л.22], в которой на примере продольно-регулярных систем были продемонстрированы возможности МЧО при решении сложных некординатных задач электродинамики.

Что касается продольно-некординатных задач, то для них (как упоминалось выше) МЧО продвинуто значительно слабее. Хотя здесь и имеются примеры решения достаточно сложных задач [Л.12], в целом, метод нуждается в развитии и обобщении.

Изложенное выше свидетельствует о насущной необходимости разработки МЧО в плане расширения круга задач, решаемых на его основе, выяснения вопросов его сходимости, установления связи с другими методами с тем, чтобы обеспечить возможность создания устойчивых и быстродействующих алгоритмов для машинного проектирования устройств СВЧ, КВЧ и субмиллиметрового диапазонов волн.

**Цель диссертации** — построение и исследование на базе новых подходов в МЧО достоверных моделей элементов и устройств СВЧ и КВЧ диапазонов, позволяющих на электродинамическом уровне строго проводить расчет и оптимизацию элементов и устройств в подсистемах машинного проектирования.

**Методы исследования.** Основные теоретические результаты работы базируются на строгих методах: методе частичных областей, интегральном преобразовании Зоммерфельда-Ватсона, МЧО в сочетании с методом граничных элементов, МЧО в сочетании с методом полуобращения

интегрального оператора, методах теории функций комплексного переменного.

**Научная новизна.** В результате выполнения работы:

— Введено понятие "относительной сходимости" решений СЛАУ при использовании метода редукции. Выполнено обоснование сходимости МЧО на примерах простейших задач о скачкообразных нерегулярностях.

— Разработан новый вариант МЧО, позволяющий строить электромагнитное поле в выделенных координатных областях для задач о соединениях прямоугольных волноводов. Разработан новый вариант МЧО применительно к задачам, содержащим двумерные некоординатные области треугольной формы.

— Исследованы теоретически и проверены экспериментально волноводные калориметрические нагрузки в СВЧ и КВЧ диапазонах на основе изломов прямоугольного волновода в Е и Н плоскостях.

— Разработан обобщенный метод разделения переменных применительно к задачам дифракции на гладких идеально отражающих цилиндрах с поперечным сечением сложной формы.

— Разработан новый метод, основанный на объединении МЧО с методом граничных элементов для задач дифракции на периодических поверхностях сложного профиля.

— Разработана подсистема моделирования элементов и узлов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе связанных полосковых линий передачи с квази-Т волнами, расположенных в одной и двух плоскостях трехслойной диэлектрической среды. Подсистема позволила создать новые элементы на связанных полосковых линиях, нашедшие применение в интегральных СВЧ усилителях повышенной мощности на полевых транзисторах.

— Разработаны электродинамические модели микроволновода, симметричной щелевой линии (СЩЛ) и однополосковой линии передачи (ОЛП). На основе модели микроволновода созданы мостовое устройство и противофазный делитель мощности.

— Изложены основы теории излучающихся волн в открытой с "боков" микрополосковой линии передачи. Обнаружена новая вытекающая волна квази-Е типа, имеющая нулевую частоту отсечки.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается:**

— соответствием постановок граничных задач предложенным электродинамическим моделям исследуемых устройств;

— использованием электродинамических методов расчета нерегулярных структур в сочетании с теоремой единственности решений уравнений Максвелла;

— соответствием теоретических результатов проведенным экспериментальным исследованиям;

— разработкой реальных конструкций калориметрических нагрузок на основе изломов волноводов в Е и Н плоскостях (как с твердым, так и с жидким поглотителем);

— разработкой реальных элементов на связанных полосковых линиях (мостов, делителей мощности, согласующих цепей и т.п.) для применения в усилителях повышенной мощности на полевых транзисторах, не уступающих лучшим зарубежным аналогам.

**Практическая ценность работы** заключается:

— в расширении круга задач, решаемых при использовании новых вариантов МЧО в строгой электродинамической постановке;

— в разработке алгоритмов расчета калориметрических нагрузок для СВЧ и КВЧ диапазонов на основе изломов прямоугольного волновода в Е и Н плоскости;

— в разработке подсистемы моделирования функциональных элементов на связанных полосковых линиях передачи, позволяющей находить оптимальные характеристики элементов по заданным критериям;

— в создании оригинальных конструкций делителей-сумматоров для применения, в частности, в усилителях СВЧ повышенной мощности;

— в предложении и исследовании нового типа линий передачи — однополосковой линии;

— в предложении оригинальных полосковых устройств на поверхностных волноводных волнах.

Технические решения на элементы в микрополосковом исполнении защищены двумя авторскими свидетельствами и одним свидетельством на полезную модель.

Полученные в процессе работы результаты используются при разработке преобразователей электромагнитной энергии в тепловую, а также при создании элементной базы систем передачи и обработки информации в СВЧ и КВЧ диапазонах.

**Реализация и внедрение результатов.** Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое использование на ряде предприятий, занимающихся выпуском радиоэлектронных изделий. Так, подсистема машинного моделирования нагрузок с изломом прямоугольного волновода в Е и Н плоскостях была внедрена в Мыгичинском научно-исследовательском институте радионизмерительных прибо-

ров (МНИИРИП). При ее использовании были выполнены НИОКР "Мегаватт-89", "Матадор-5" и другие. Экономический эффект от внедрения подсистемы моделирования нагрузок в МНИИРИП составил более 920 тыс. рублей в год (в ценах 1990 г.).

Результаты диссертации по разработке ряда оригинальных микрополосковых элементов, в частности, делителя-сумматора мощности, позволили создать высококачественный усилитель повышенной мощности на полевых транзисторах с КПД  $> 25\%$  и низким уровнем гармоник на выходе, к тому же обладающий автоматической системой отключения при работе на рассогласованную нагрузку. Усилитель изготовлен при проведении ОКР "Оттепель-1" по заказу ОАО "Радиофизика" (г. Москва) и предназначен для работы в бортовом радиопередающем модуле "Ритм-Ки".

Исследования, относящиеся к многополосковым связанным линиям передачи, привели к созданию оптимальных по характеристикам функциональных элементов, которые впервые в РФ были использованы при разработке серии импульсных усилителей повышенной мощности 10см диапазона типа УМ-10-10, УМ-10-15 на полевых транзисторах. Усилители изготовлены по заказу КБ "Лира" (г. Москва) и предназначены для работы в радиопередающем модуле специального назначения.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Вопросы обоснования сходимости МЧО на примерах простейших задач о скачкообразных нерегулярностях. Введение понятия "относительной сходимости" решений СЛАУ при использовании метода редукции.

2. Разработка нового варианта МЧО, обеспечивающего построение поля в выделенных координатных областях для задач о сочленениях прямоугольных волноводов; разработка нового варианта МЧО применительно к задачам, содержащим двумерные некоординатные области треугольной формы.

3. Разработка и исследование характеристик моделей волноводных калориметрических нагрузок в СВЧ и КВЧ диапазонах на основе изломов прямоугольного волновода в E и H плоскостях.

4. Развитие обобщенного метода разделения переменных применительно к задачам дифракции на гладких идеально отражающих цилиндрических рассеивателях с поперечным сечением сложной формы.

5. Разработка нового метода, основанного на объединении МЧО с методом граничных элементов, для задач дифракции на периодической поверхности сложной формы.



6. Разработка подсистемы моделирования элементов и узлов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе связанных полосковых линий передачи с квази-Т волнами, расположенных в одно и двух плоскостях трехслойной диэлектрической среды. Применение подсистемы для создания новых элементов на связанных полосковых линиях, обладающих улучшенными электрическими и габаритными характеристиками.

7. На основе сочетания МЧО с методом полуобращения интегрального оператора разработка электродинамических моделей; микроволновое, симметричной щелевой линии и новой линии передачи — однополосковой линии. Создание оригинальных схмотехнических элементов на основе этих линий.

8. Построение основ теории вытекающих волн в открытой с "боков" микрополосковой линии передачи.

*Апробация работы.* Результаты работы докладывались и обсуждались на:

— VIII Всесоюзной научно-технической конференции по микроэлектронике (Зеленоград, МИЭТ, 1978);

— Межведомственной конференции "Машинное проектирование устройств и систем СВЧ" (Киев, 1974, 1981);

— Московском семинаре НТОРЭС им. А.С. Попова (МИЭТ, 1976, 1978);

— 34-й и 39-й Всесоюзных научных сессиях, посвященных Дню радио (Москва, 1981, 1984);

— Республиканской научно-технической конференции "Расчет и проектирование полосковых антенн" (Свердловск, 1982);

— Всесоюзной научно-технической конференции "Развитие и внедрение новой техники радиоприемных устройств" (Горький, 1985);

— I Всероссийской научно-технической конференции "Радиоприем и обработка сигналов" (Н. Новгород, 1993).

— III Всесоюзной научно-технической конференции "Математическое моделирование и САПР радиоэлектронных систем СВЧ на объемных интегральных схемах (ОИС)" (Москва, 1989);

— XI Научно-технической конференции, посвященной Дню радио (Москва, 1985);

— I Научно-технической конференции по интегральной электронике СВЧ (Новгород, 1982);

— Всесоюзной научно-технической конференции "Интегральная электроника СВЧ" (Красноярск, 1988);

— Всесоюзном научно-техническом семинаре "Математическое моделирование и создание САПР для расчета, анализа и синтеза антенных систем и их элементов" (Ростов Великий, 1990);

— IX Международной школе-семинаре "Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ" (Самара, 1997);

— VI Международной конференции "Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ" (Самара, 1999).

По результатам диссертационной работы имеется 57 научных публикаций, получено 2 авторских свидетельства на изобретения и одно свидетельство на полезную модель.

**Объем и структура диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 294 страницы основного текста, включая 93 рисунка, 27 таблиц, а также 21 страницу списка литературы из 244 наименований и приложения, содержащего 3 акта о внедрении результатов диссертации.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении излагается современное состояние вопроса, ставится цель диссертационной работы, обосновывается актуальность, формируются задачи исследований, определяются новизна полученных результатов и их практическая значимость, формулируются положения, выносимые на защиту, кратко излагается содержание диссертации.

Первая глава начинается с изложения вспомогательных вопросов, играющих однако важную роль при оценке решений граничных задач электродинамики, получаемых методом частичных областей.

В качестве первого вопроса рассматривается условие на ребре, под которым подразумевается поведение электромагнитного поля вблизи линии геометрической сингулярности. Показывается, что характер поведения поля вблизи ребра определяется из общезначимого закона превращения в тепло поступающей в заданный объем электромагнитной энергии. Общепринятая трактовка условия на ребре, как следствия конечности энергии поля, запаасаемой в ограниченном объеме, вытекает из этого закона как частный случай.

В главе рассматриваются СЛАУ, получающиеся при применении МЧО. Подчеркивается, что неадекватность СЛАУ исходной граничной задаче означает нарушение граничных условий (условий непрерывно-

сти), формулируемых при постановке исходной задачи. В частности, некоторые СЛАУ могут иметь множество решений и истинные в том числе. Для выбора истинного решения привлекают результат решения локальной задачи (вблизи ребра) и тем самым восстанавливают эквивалентность СЛАУ исходной задаче (при этом граничные условия также оказываются выполненными).

Второй вспомогательный вопрос связан с понятием относительной сходимости решений СЛАУ, отличающимся от приведенных в литературе тем, что в нем учитывается поведение искомых коэффициентов при больших индексах.

Приводятся следующие определения.

1. Пусть  $\{A_n\}_1^N$  — последовательность коэффициентов разложения какой-либо компоненты поля в плоскости стыка по ортонормированной системе  $N$  собственных функций одного из сочленяемых волноводов. Пусть также эта последовательность является решением редуцированной СЛАУ. Решения СЛАУ будем называть физическими, если выполняется условие:

$$\lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ n \rightarrow \infty \\ (n \leq N)}} A_n^{(N)} = 0.$$

2. Пусть  $\{A_n\}_1^N$  — решение редуцированной СЛАУ. Будем считать, что исходная СЛАУ обладает относительной сходимостью, если последовательность

$$\{A_n\}_1^\infty = \lim_{N \rightarrow \infty} \{A_n\}_1^N,$$

где  $\{A_n\}_1^N$  — физические решения редуцированной СЛАУ, отличается от истинного решения данной СЛАУ.

Приведенные определения позволяют исключить из рассмотрения расходящиеся решения СЛАУ.

Далее на примерах задач дифракции  $H_{p0}$  на ступеньке и бесконечно тонкой диафрагме в плоском (прямоугольном) волноводе с идеальной металлизацией изучается структура матричных операторов задачи, порождающих СЛАУ II рода, парную СЛАУ и СЛАУ I рода (в задаче о диафрагме).

СЛАУ II рода имеет вид

$$A_m + \sum_{n=1}^{\infty} q_{mn} A_n = f_m, \quad m = 1, 2, \dots \quad (1)$$

где матричный оператор задачи  $\hat{q} = \{q_{mn}\}_{1,1}^{\infty}$  может быть представлен в виде  $\hat{q} = \hat{q}_{\text{ст.}} + \hat{q}_{\text{д.}}$ , ( $\hat{q}_{\text{ст.}}$  — статический оператор,  $\hat{q}_{\text{д.}}$  — динамический (зависящий от частоты) оператор задачи).

Показывается, что  $\hat{q}_{\text{ст.}}$  является самосопряженным оператором, а  $\hat{q}_{\text{д.}}$  — вполне непрерывным оператором в  $l_2$ ; правая часть  $\hat{f} = \{f_m\}_1^{\infty} \in l_2$ .

Учитывая эквивалентность СЛАУ (1) исходной граничной задаче и принимая во внимание альтернативу Фредгольма, получаем утверждение: решение СЛАУ (1) существует, единственно и принадлежит  $l_2$ . оно может быть найдено как предел при  $N \rightarrow \infty$  ( $N$  — порядок усеченной СЛАУ) сходящихся по норме  $l_2$  решений усеченной СЛАУ (1).

Решение парной СЛАУ сводится к нахождению минимума следующего функционала

$$\Phi(\alpha) = \|\hat{F}A - f\|^2 + \alpha \|\hat{E}A - e\|^2, \quad (2)$$

где  $\hat{F}$  и  $\hat{E}$  — матричные операторы СЛАУ,  $f$  и  $e$  — правые части (заданные столбцы),  $\alpha$  — произвольное положительное число,  $A$  — искомое решение СЛАУ.

Решение задачи по минимизации сводится к решению СЛАУ следующего вида:

$$\alpha \hat{E}^* (\hat{E}A - e) + \hat{F}^* (\hat{F}A - f) = 0. \quad (2)$$

Показывается, что матричный оператор СЛАУ (3) представляется в виде суммы трех операторов: оператора типа Винера-Хопфа, симметричного и вполне непрерывного в  $l_2$ . Ключевым моментом здесь является определение спектра оператора типа Винера-Хопфа через вычисление его символа, который совпадает с положительным отрезком вещественной оси.

Далее задача сводится к альтернативе Фредгольма и утверждению, аналогичному сформулированному выше.

СЛАУ I рода путем замены переменных и умножения на соответствующий диагональный оператор приводится к ограниченному и обратимому в  $l_2$  оператору, к которому также применима альтернатива Фредгольма, и решение которого может находиться методом редукции.

В конце главы рассматривается задача дифракции  $H_{0p}$  волны на соосном ступенчатом сочленении круглых волноводов. Особенность этой задачи состоит в том, что в обоих волноводах учитывается конечное число волн  $M$  и  $N$ , т.е. матричный оператор задачи вычисляется приближенно. Тем не менее и в этом случае решение СЛАУ II рода, к которой сводится граничная задача, может быть найдено как предел при  $M \rightarrow \infty$ ,  $N \rightarrow \infty$  сходящихся по норме  $l_2$  к точному решению задачи приближенных решений СЛАУ. Особо следует отметить, что порядок устремления к бесконечности чисел  $M$  и  $N$  несущественен. Однако, с точки зрения получения достаточно точного результата при небольших  $M$  и  $N$ , можно установить между ними некоторое оптимальное соотношение, при котором целесообразно проводить вычисления.

Во второй главе излагается новый вариант метода частичных областей применительно к задачам, содержащим частичные области с координатными границами в прямоугольном волноводе. Такие области появляются при решении задач дифракции на разветвлениях прямоугольного волновода в  $E$  и  $H$  плоскостях и имеют вид параллелепипедов, выделенных на рис. 1 пунктирной линией.

Основная трудность при решении подобных задач заключается в построении электромагнитного поля в выделенных областях. Такие задачи решают, как правило, либо методом перепределенных рядов [Л.23], либо методом частичных пересекающихся областей [Л.24]. Следует отметить, что и в том и другом методе присутствует эвристическое начало: электромагнитное поле в выделенных областях представляется в виде рядов по функциям — решениям волнового уравнения, которые задаются априори.

В данной главе излагается подход, который предполагает обоснованную процедуру построения поля в выделенных областях, заключающуюся в использовании преобразования Зоммерфельда–Ватсона и

условий непрерывности тангенциальных компонент полей на границах сопрягаемых областей.

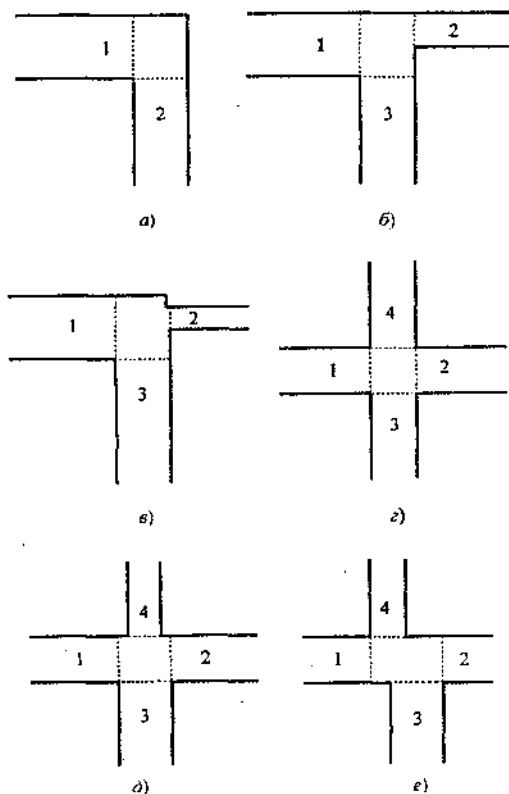


Рис. 1.

Сначала рассматривается задача дифракции  $H_{10}$  волны, падающей со стороны плеча 1 на соединение волноводов в  $H$  плоскости, изображенное на рис. 1б. Затем с использованием леммы Лорентца находятся амплитуды отраженных волн в области 1 через коэффициенты разложений полей в областях 2 и 3. После этого строится процедура продолжения поля из области 1 в выделенную область. В результате показывается, что поле в выделенной области может быть записано в виде суперпозиции волн обоих направлений волновода 1 и "вычетных" волн.

Последние представляют собой собственные волны волновода 3 обоих направлений, удовлетворяющие на верхней границе выделенной области условию электрической стенки.

Далее в главе решаются две более сложные задачи: о дифракции волны  $H_{10}$ , падающей со стороны плеча 1, на  $X$ -соединении прямоугольных волноводов в  $E$  и  $H$  плоскостях (рис. 1е).

В этом случае выделенная область разделяется естественным образом на три подобласти, в каждой из которых поле представляется в виде суперпозиции волн обоих направлений волновода 1 и волн обоих направлений волноводов 3 и (или) 4. Для  $X$ -соединения волноводов в  $H$  плоскости построен алгоритм решения дифракционной задачи, который был реализован на ЭВМ. Приведенные в главе результаты расчетов показывают, что алгоритм устойчив при любых приближениях и обладает достаточно хорошей сходимостью.

В главе 3 излагается новый вариант МЧО применительно к задачам, содержащим некоординатные области треугольной формы. Такие области образуются в простейшем виде стенками прямоугольного (или плоского) волновода с одной стороны и наклонной границей — с другой (рис. 2а).

Сначала рассматривается двумерная задача дифракции  $H_{p0}$  волны на идеальной электрической заглушке, расположенной в плоскости  $Z = 0$  плоского волновода (рис. 2а). Представляя поле в регулярном волноводе  $z < 0$  в виде падающей и отраженных волн можно увидеть, что это разложение экспоненциально расходится в области  $z > 0$ . Применяя для продолжения поля в область  $z > 0$  интегральное преобразование Зоммерфельда–Ватсона, получаем в итоге следующий результат: поле в треугольной области представляется в виде суперпозиции волн обоих направлений регулярного волновода и так называемых уголкового волн, которые получились автоматически при вычислении вычетов в интегральном преобразовании.

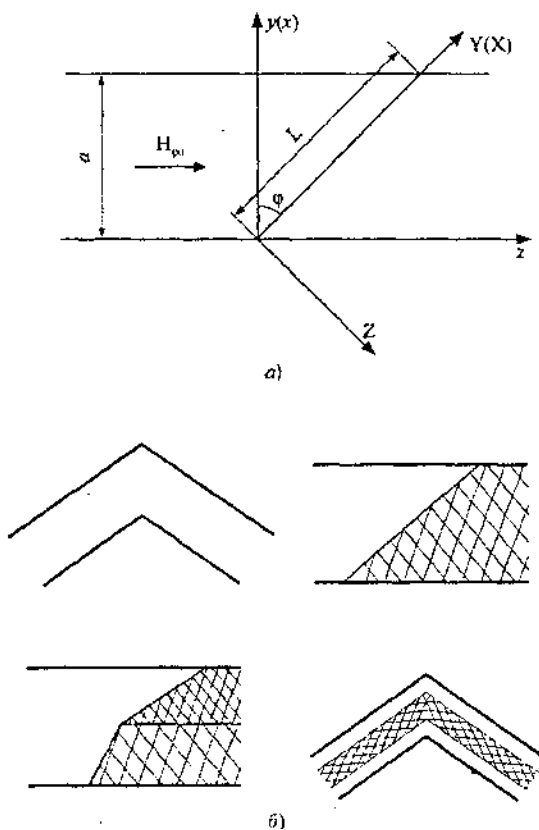


Рис. 2.

Далее в главе выясняется природа уголкового волн. Оказывается, что они имеют отношение к общей проблеме представления решений в форме с разделяющимися переменными, и, в частности, к инвариантности решений уравнения Гельмгольца относительно операций смещения и поворота прямоугольной декартовой системы координат на произвольный угол. Показывается, что уголкового волны есть решения уравнения Гельмгольца, полученные из исходных волноводных волн путем применения упомянутых операций смещения и поворота. По своей структуре уголкового волны являются, вообще говоря, комплексными волнами.



Большое место в главе отводится анализу и оптимизации калориметрических нагрузок на основе изломов прямоугольных волноводов в  $H$  и  $E$  плоскостях. Задача о нагрузках решается методом частичных областей с уголковыми волнами. Приведенные в главе экспериментальные данные свидетельствуют о хорошем согласии между теорией и экспериментом.

Описываемый подход может быть использован для анализа нерегулярных волноводов, изображенных, к примеру, на рис. 26.

В этой же главе строится алгоритм задачи дифракции на гладкой некоординатной границе раздела сред в волноводе произвольного поперечного сечения. В предположении рэлеяевской границы получается СЛАУ, позволяющая находить искомые амплитуды волн и вычислять электромагнитное поле в волноводе вплоть до границы раздела сред. В качестве примера решается задача дифракции  $H_{10}$  волны на диэлектрическом стержне в прямоугольном волноводе, расположенном параллельно его узким стенкам. Результаты решения СЛАУ совпадают с данными, приведенными в [Л. 14]. Завершает главу изложение варианта МЧО, заключающегося во введении в окрестности линии геометрической сингулярности дополнительный ЧО цилиндрической формы — реберной трубки. Внутри трубки поле раскладывается в ряд по функциям, учитывающим особенности на ребре, а вне трубки — по гладким функциям. Апробация этого подхода, проведенная на задачах дифракции  $E$  и  $H$  волн на ступеньке и диафрагме в плоском волноводе показала значительно более высокую сходимость приближений по сравнению с традиционным МЧО.

Четвертая глава посвящена, в основном, изложению новых подходов к решению двумерных задач дифракции плоской волны на гладких идеально проводящих некоординатных рассеивателях в виде цилиндров сложного поперечного сечения и отражательных решеток произвольного профиля.

Известно, что аналитическое продолжение рассеянного поля в поставленных задачах дифракции заканчивается в особых точках, которые располагаются внутри рассеивателя и которые достаточно хорошо изучены [Л. 25]. Идея предлагаемого подхода заключается в том, что указанные точки выбираются в качестве центров разложения рассеянного поля по радиальным расходящимся волнам, т.е. вводятся несколько локальных цилиндрических систем координат с центрами в особых точках. Ввиду отсутствия строгого теоретического обоснования эффективность подхода иллюстрируется численно на примерах задач дифракции

на цилиндрах в виде многолистника, "гантели" и эллипса. Для многолистника, контур которого описывается кривой  $\rho(\varphi) = a + \varepsilon \sin M\varphi$  (рис. 3,  $\varepsilon = 0,9a$ ,  $M = 10$ ) построена диаграмма рассеяния. Во всех случаях продемонстрировано удовлетворение граничному условию на поверхности рассеивателя.

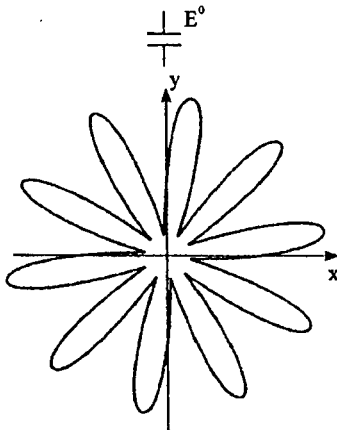


Рис. 3

Далее в главе описывается новый подход применительно к задачам дифракции на периодической поверхности. Он основывается на сочетании МЧО с методом граничных элементов (МГЭ) и позволяет построить поле в любой точке нерегулярной области. В качестве примера в диссертации рассматривается задача дифракции плоской  $E$  поляризованной волны на периодической поверхности синусоидальной формы

$$y(x) = b \left( \cos \frac{2\pi x}{l} - 1 \right) \quad (l - \text{период поверхности}).$$

Численные эксперименты, проводившиеся при  $2\pi b/l < 12$ , показывают устойчивую работу алгоритма и дают приемлемые для практики результаты.

Глава завершается детальным исследованием сходимости метода Рэля и сопоставлением результатов, даваемых этим методом и МЧО-МГЭ. Отмечается, что критерий применимости гипотезы Рэля, опи-

рающийся на проверку граничных условий, и энергетический критерий дают разные результаты.

В пятой главе диссертации излагается применение МЧО для анализа полосковых линий передачи и моделирования устройств на их основе. Так, приводится строгое решение статической задачи о распределении токов и зарядов на связанных бесконечно тонких полосковых проводниках, расположенных в одной и двух плоскостях трехслойной диэлектрической среды. Это решение используется затем для нахождения собственных квази- $T$  волн в структуре и вычисления омических потерь в ней. Потери в полосковых проводниках рассчитываются в приближении сильного скин-эффекта по методике, изложенной в [Л. 26]. Приводятся результаты расчетов погонных потерь в основных линиях перспективности применение этих линий в КВЧ диапазоне. Приводятся также результаты сравнения в экспериментом.

Описанный алгоритм положен в основу разработки подсистемы моделирования полосковых устройств, с помощью которой создано большое число элементов на связанных полосковых линиях, включая оригинальные (делители мощности с трансформацией импедансов, симметрирующие трансформаторы, мостовые устройства и др.).

Далее в главе на основе сочетания МЧО с методом полуобращения интегрального оператора [Л. 27] излагается строгая теория новой линии передачи для интегральных схем СВЧ и КВЧ диапазонов — однополосковой линии передачи (ОЛП). Она состоит из полоскового проводника, расположенного на неметаллизированной диэлектрической подложке конечной толщины (рис. 4). ОЛП предложена сравнительно недавно [56] и рекомендована для использования в объемных интегральных схемах (ОИС) [Л.28, Л.29]. Основной волной в линии является квази- $E$  волна с характерной продольной компонентой электрического поля. Проведенные исследования показывают, что при широком проводнике в ОЛП существует помимо основной волны поверхностная волна красного типа, поле которой концентрируется вблизи ребер проводника. При малой ширине проводника поверхностные волны в линии отсутствуют.

В главе приводятся также результаты анализа микроволновода — микрополосковой линии с широким проводником и симметричной шелевой линии (СЦЛ) с широкой щелью. Описываются два защищенных авторскими свидетельствами устройства на микроволноводе, в которых используются две рабочие волны (квази- $T$  волна и волноводная волна низшего типа): мостовое устройство и противофазный делитель. При исследовании СЦЛ с широкой щелью выясняется, что поверхностные

волны высших типов в линии разделяются на краевые волны и волноводные волны.

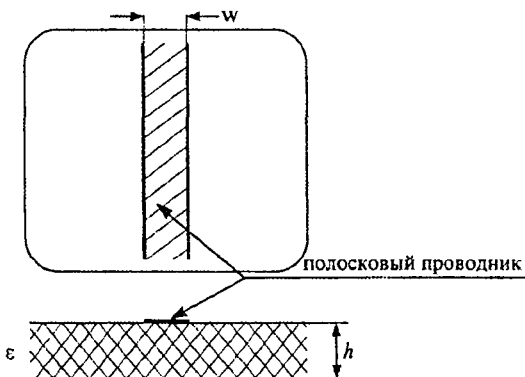


Рис. 4

В заключение главы излагаются основы теории вытекающих волн в открытой с "боков" микрополосковой линии передачи. Предварительно доказывается утверждение о возможности представления поля вытекающей волны в линии интегралом типа Фурье. В итоге задача сводится к СЛАУ, решение которой находится методом редукции. Анализ решений позволил обнаружить в линии вытекающую волну с нулевой частотой отсечки и определить сложный характер ее дисперсии.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в процессе работы над диссертацией.

В приложении приведены акты внедрения результатов диссертации.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Дано понятие "физического решения" СЛАУ. Введено отличное от приведенных в литературе понятие "относительной сходимости" СЛАУ при нахождении приближенных решений методом редукции.

2. На примерах двумерных задач дифракции на скачкообразных нерегулярностях показано, что с помощью МЧО задачи могут быть сведены к СЛАУ II рода, парной СЛАУ или СЛАУ I рода, приближенное решение которых правомерно находить методом редукции. При этом приближенное решение при увеличении порядка СЛАУ стремится к истин-

ному по норме пространства, выводимой из условия конечности энергии поля в ограниченном объеме.

3. Предложен новый вариант МЧО, обеспечивающий процедуру построения поля как в выделенных координатных областях, так и некоординатных областях треугольной формы. Метод базируется на использовании преобразования Зоммерфельда-Ватсона и условиях непрерывности касательных составляющих полей на границе соприкасающихся областей. Показано, что в представлении электромагнитного поля в треугольной области необходимо учитывать уголкового волны, найденные теоретически.

4. На основе МЧО с уголковыми волнами разработана подсистема моделирования волноводных калориметрических нагрузок, прошедшая этапы апробации и внедрения на одном из предприятий радиоизмерительной отрасли. Подсистема позволила провести разработку и внедрить в производство ряд нагрузок в СВЧ и КВЧ диапазонах на основе излома волноводов в  $E$  и  $H$  плоскостях.

5. Для волноводных нерегулярностей с гладкими рэлеевскими границами развит вариант МЧО, позволяющий находить интегральные характеристики поля и вычислять электромагнитное поле в ЧО. Предложен и апробирован вариант МЧО, основанный на выделении реберных трубок в окрестности линий геометрической сингулярности. Показано, что введение реберных трубок существенно повышает сходимость метода.

6. Развит обобщенный метод разделения переменных применительно к задачам дифракции плоской волны на идеально отражающих цилиндрических рассеивателях. Показано, что метод позволяет получать устойчивые алгоритмы даже в случаях, когда поперечные сечения цилиндров значительно отличаются от круга. Решены задачи дифракции плоской  $E$  поляризованной волны на проводящих цилиндрах с поперечным сечением в виде "гантели", эллипса и многолистика.

7. Предложен и развит МЧО в сочетании с МГЭ применительно к задачам дифракции на периодической поверхности произвольной формы. Метод позволяет вычислять электромагнитное поле в любой точке нерегулярной области.

8. Разработана подсистема моделирования элементов и узлов СВЧ и КВЧ диапазонов на основе связанных полосковых линий передачи с квази- $T$  волнами, расположенных в одной или двух плоскостях трехслойной диэлектрической структуры. Применение подсистемы позво-

лило создать новые элементы на связанных полосковых линиях с улучшенными характеристиками.

9. На основе сочетания МЧО с методом полубращения интегрального оператора разработаны электродинамические модели микроволновода, СЩЛ и ОЛП. На основе микроволновода созданы оригинальные схмотехнические устройства.

10. Изложены основы теории излучающихся волн в открытой с "боков" микрополосковой линии передачи. Найдена новая вытекающая волна с нулевой частотой отсечки.

### **ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:**

1. Веселов Г.И., Темнов В.М. О применимости метода редукции при решении алгебраических систем в некоторых задачах дифракции // ЖВМ и МФ, 1984. № 9. С. 1381-1391.

2. Темнов В.М. Перспективы развития метода Олинера для анализа нерегулярностей в полосковых линиях передачи // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. Москва, 1994. № 4. С. 41-44.

3. Веселов Г.И., Темнов В.М. О построении базовых алгоритмов для систем машинного проектирования полосковых устройств // Сб. научн. трудов "Микроэлектронные радиотехнические устройства и техника СВЧ". М.: МИЭТ, 1980. С. 102-119.

4. Веселов Г.И., Темнов В.М. О решении некоторых систем уравнений в электродинамике и явлении относительной сходимости // Радиотехника и электроника, 1981. Т. 26. № 10. С. 2034-2043.

5. Веселов Г. И., Темнов В. М. Метод частичных областей для дифракционных задач с некоординатными границами // Изв. вузов. Радиофизика, 1984. Т. 27. № 7. С. 919-924.

6. Темнов В. М. О построении поля в задачах дифракции волн на изломах в прямоугольном волноводе // Радиотехника и электроника, 1989. Т. 34. № 9. С. 1809-1818.

7. Темнов В. М. О построении поля в задачах дифракции волн на разветвлениях в прямоугольном волноводе // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. М., 1994. № 4. С. 45-51.

8. Веселов Г. И., Темнов В. М. Метод частичных областей для задач с некоординатными границами // Радиотехника, 1982. Т. 37. № 8. С. 71-74.

9. Темнов В. М., Постников И. И., Ким А. Ч. Расчет калориметрической нагрузки в прямоугольном волноводе с изломом в Н-плоскости // Радиотехника, 1989. № 2. С. 65-66.

10. Ким А. Ч., Моргаловский В. П., Постников И. И., Темнов В. М. Электродинамический анализ калориметрической нагрузки на основе излома прямоугольного волновода в Н-плоскости // Изв. вузов. Радиофизика, 1990. Т. 33. № 6. С. 991-993.

11. Темнов В. М., Базылева Г. В. Применение метода частичных областей к задаче дифракции на диэлектрическом стержне в прямоугольном волноводе // Сб. науч. трудов. Микроэлектронные системы и СВЧ устройства. М.: МИЭТ, 1984. С. 27-32.

12. Темнов В. М., Варданашвили М. В. Дифракция электромагнитных волн на гладкой отражательной периодической поверхности // Сб. науч. трудов "Микроэлектронные системы и СВЧ устройства". — М.: МИЭТ, 1984. С. 33-40.

13. Веселов Г. И., Темнов В. М., Ружицкий С. В. О построении регуляризирующих операторов для одного класса электродинамических задач // Тезисы докладов XXXVI Всесоюзной научной сессии, посвященной Дню радио. — М., 1981. Ч. 1. С. 19-20.

14. Веселов Г. И., Платонов Н. И., Темнов В. М., Солдаткин В. Ю. Исследование решения задачи дифракции ТЕМ-волны на емкостной диафрагме в плоском волноводе // Сб. науч. трудов "Микроэлектронные радиотехнические устройства и техника СВЧ". — М.: МИЭТ, 1980. С. 20-36.

15. Веселов Г. И., Темнов В. М. О решении СЛАУ в задачах электродинамики при использовании метода частичных областей // Сб. науч. трудов "Микроэлектронные радиотехнические устройства и техника СВЧ". М.: МИЭТ, 1980. С. 120-132.

16. Веселов Г. И., Темнов В. М. О разработке базовых алгоритмов для систем машинного проектирования волноводно-полосковых устройств // Научные труды вузов Литовской ССР "Радиоэлектроника". Вильнюс, 1980. Т. 16. № 2. С. 84-99.

17. Веселов Г. И., Темнов В. М. О решении систем линейных алгебраических уравнений первого рода в задачах электродинамики при использовании метода частичных областей // Тезисы докладов VIII Всесоюзной научно-технической конференции по микроэлектронике. М.: МИЭТ, 1978. С. 58.

18. Темнов В. М., Титаренко А. А. Метод реберных трубок в двумерных задачах дифракции // Тезисы докладов VI Международной конфе-

ренции «Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ». — Самара, 1999. Т. 7. № 2 (23). С. 60.

19. Темнов В. М., Титаренко А. А. Метод реберных трубок в задачах дифракции электромагнитных волн // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2000, Т. 3. № 1.

20. Веселов Г. И., Темнов В. М., Ружицкий С. В. Регуляризирующие операторы для решения двумерных задач с некоординатными границами // Сб. науч. трудов. Микроэлектронные радиотехнические устройства обработки информации и техника СВЧ. — М.: МИЭТ, 1981. С. 77-84.

21. Темнов В. М., Базылева Г. В. Автоматизированное проектирование согласованных волноводных нагрузок миллиметрового диапазона волн // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Развитие и внедрение новой техники радиоприемных устройств. — М.: Радио и связь, 1985. С. 111.

22. Веселов Г. И., Темнов В. М., Ружицкий С. В. Представление электромагнитного поля в нерегулярной области, образованной наклонной границей в плоском волноводе // Сб. науч. трудов. Расчет и проектирование элементов и узлов микроэлектронных радиотехнических систем и цепей СВЧ. — М.: МИЭТ, 1982. С. 10-18.

23. Веселов Г. И., Темнов В. М., Ружицкий С. В. Метод частичных областей для задач с некоординатными границами // Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. Расчет и проектирование полосковых антенн. — Свердловск, 1982. С. 79-81.

24. Веселов Г. И., Темнов В. М. О построении системы собственных функций нерегулярной области // Сб. науч. трудов. Приборы и методы автоматизации экспериментальных исследований. — Днепропетровск: ДГУ, 1983. С. 172-176.

25. Темнов В. М., Варданашвили М. В. Применение метода частичных областей для анализа открытого диэлектрического волновода со сложной формой поперечного сечения // Сб. науч. трудов. Электродинамика и радиофизическое приборостроение. — Днепропетровск: ДГУ, 1983. С. 33-38.

26. Постников И. И., Ким А. Ч., Моргаловский В. П., Темнов В. М. Численный анализ калориметрической нагрузки в прямоугольном волноводе с изломом в  $H$  плоскости // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара. Математическое моделирование и создание САПР для расчета, анализа и синтеза антенных систем и их элементов. — Ростов Великий, 1990.

27. Темнов В. М., Ким А. Ч., Моргаловский В. П., Постников И. И. Математическое моделирование калориметрической нагрузки в прямо-



угольном волноводе с изломом // Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара. Математическое моделирование и создание САПР для расчета, анализа и синтеза антенных систем и их элементов. — Ростов Великий, 1990. — С. 65.

28. Веселов Г. И., Темнов В. М. Метод частичных областей для некоторых внешних задач электродинамики // ДАН УССР. Сер. А, 1984. № 9. С. 57-60.

29. Темнов В. М. Анализ калориметрической нагрузки на основе излома прямоугольного волновода в Е-плоскости // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника, 1989. Вып. 2. С. 27-34.

30. Темнов В. М. К расчету нагрузок повышенной мощности на основе излома прямоугольного волновода // Радиотехника и электроника, 1990. Т. 35. № 2. С. 421-423.

31. Темнов В. М., Базылева Г. В. Применение метода частичных областей к задаче дифракции на диэлектрической шайбе в прямоугольном волноводе // Труды научно-технической конференции: Решение внутренних краевых задач электродинамики. — Ростов-на-Дону: РГУ, 1984. С. 31-32.

32. Темнов В. М., Варданашвили М. В. об одном варианте обобщенного метода разделения переменных в задаче рассеяния на идеально проводящем цилиндре с сечением в виде гофра // Изв. вузов. Радиофизика, 1988. Т. 31. № 7. С. 834-838.

33. Темнов В. М., Варданашвили М. В. Применение метода разделения переменных к задаче дифракции на цилиндре сложной формы // Радиотехника, 1987. № 5. С. 71-74.

34. Темнов В. М., Варданашвили М. В. Алгоритм расчета волноводных фильтрующих элементов для входных трактов радиоприемников // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции: Развитие и внедрение новой техники радиоприемных устройств. — М.: Радио и связь, 1985. С. 135.

35. Темнов В. М., Варданашвили М. В. Дифракция электромагнитных волн на гладких металлических заглушках сложного профиля в прямоугольном волноводе // Сб. науч. трудов. Методы и средства моделирования в системах обработки сигналов. — Днепропетровск: ДГУ, 1987. С. 19-21.

36. Темнов В. М., Варданашвили М. В. К расчету дифракционных полей для гладких идеально отражающих периодических поверхностей сложного профиля // Лекции школы-семинара по объемным интегральным схемам (ОИС). — Тбилиси, 1988. С. 144-145.

37. Маловичко А. А., Темнов В. М. О построении функциональных устройств на основе многослойных интегральных схем // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ, 1995. Т. 3. Вып. 4. С. 50-64.

38. Маловичко А. А., Темнов В. М. О построении функциональных устройств на основе многослойных интегральных схем // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ, 1995. Т. 3. Вып. 4. С. 50-64.

39. Темнов В. М., Петухов Б. А. ТОО "Октава". Полосковый делитель мощности: Свидетельство на полезную модель № 12630 РФ. Приоритет от 16.06.1999; зарег. 20.01.2000.

40. Темнов В.М. Анализ электродинамических характеристик полоскового микроволновода // Техника средств связи. Сер. Радионизмерительная техника. 1976. Вып. 2. С. 43-46.

41. А.С. № 1029798 (СССР). Противофазный делитель / Г.И. Веселов, А.А. Маловичко, В.М. Темнов, В.Ю. Солдаткин. Зарег. 1983.

42. А.С. № 934874 (СССР). Мостовое устройство / Г.И. Веселов, В.М. Темнов, В.Ю. Солдаткин. Зарег. 1982.

43. Веселов Г.И., Темнов В.М. Электродинамическая теория вытекающих волн в микрополосковой линии передачи // Изв. вузов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 5. С. 576-585.

44. Темнов В.М. Излучение в полосковых структурах: вытекающие волны // Тезисы докладов IX Международной школы-семинара "Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ". — Самара, 1997. С. 64-65.

45. Веселов Г.И., Раевский С.Б. О спектре комплексных волн круглого диэлектрического волновода // Радиотехника, 1983. Т. 38. № 2. С. 55-58.

46. Веселов Г.И., Темнов В.М., Алехин Ю.Н. Электромагнитные волны в открытой микрополосковой линии // Сб. научн. трудов "Микроэлектронные радиотехнические устройства и техника СВЧ", М.: МИЭТ, 1980. С. 37-52.

47. Веселов Г.И., Темнов В.М., Ружицкий С.В. Излучающиеся волны в микрополосковой линии // Тезисы докладов Расчет и проектирование полосковых антенн, Свердловск, 1982. С. 95-97.

48. Веселов Г.И. Темнов В.М. О вытекающих волнах в микрополосковой линии передачи // Тезисы докладов XXXIX Всесоюзной научной сессии. М.: Радио и связь, 1984. Ч. 2. С. 21-22.

49. Веселов Г.И. Темнов В.М., Ружицкий С.В. Излучающиеся волны в микрополосковой линии // Тезисы докладов I научно-технической конференции по интегральной электронике СВЧ. Ч. 1. — Н. Новгород, 1982. С. 153-154.

50. Весслов Г.И., Темнов В.М. Волны высших типов в микрополосковой линии // Сб. научн. трудов. СВЧ и измерительная техника в микроэлектронике. — М.: МИЭТ, 1978. Вып. 37. С. 73-90.

51. Темнов В.М., Лелешкина В.П. К расчету характеристик квази-Т волн в многопроводной полосковой структуре // Техника средств связи. Сер. Техника радиосвязи. 1989. Вып. 2. С. 124-131.

52. Белоусов В.А., Дележкина В.Ф., Темнов В.М. Анализ устройств на связанных полосковых линиях передачи в неоднородной среде // Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции: Интегральная электроника СВЧ. — Красноярск, 1988. С. 130.

53. Темнов В.М. К расчету омических потерь в полосковых линиях передачи // Тезисы докладов IX Международной школы-семинара: Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. — Самара, 1997. С. 62-63.

54. Темнов В.М., Титаренко А.А. Метод граничных элементов в задаче дифракции на периодической поверхности // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ, 1999. Вып. 4. С. 91-102.

55. Весслов Г.И., Маловичко А.А., Темнов В.М. Объемное интегральное проектирование миниатюрных гибридных устройств на квазисосредоточенных элементах // Сб. научн. трудов. Электродинамика и радиофизическое приборостроение. — Днепропетровск: ДГУ, 1985. С. 93-94.

56. Темнов В. М. К теории однополосковой линии передачи / Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Интегральная электроника СВЧ". — Красноярск: КПИ, 1988. С. 129.

57. В. М. Поверхностные волны в однополосковой линии передачи // Изв. вузов. Радиофизика, 1991. Т. 34. № 3. С. 286-291.

## ЛИТЕРАТУРА

Л.1. Нобл Б. Метод Винера-Хопфа. — М.: ИЛ, 1962. 279 с.

Л.2. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1989. 614 с.

Л.3. Митгра Р., Ли С. Аналитические методы теории волноводов. — М.: Мир, 1974. 328 с.

Л.4. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Миттры. — М.: Мир, 1977. 485 с.

Л.5. Никольский В.В. Проекционные методы в электродинамике (экранированные и открытые системы). / Сб. научно-методических статей

по прикладной электродинамике. — М.: Высшая школа, 1977. Вып. 1. С. 4-50.

Л.6. Каценеленбаум Б.З. Высокочастотная электродинамика. — М.: Наука, 1966. 238 с.

Л.7. Вайнштейн Л.А., Электромагнитные волны. — М.: Радио и связь, 1988. 440 с.

Л.8. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайневисоких частот. — М.: Педагогика-Пресс, 1998. 327с.

Л.9. Веселов Г.И., Раевский С.Б. Слоистые металло-диэлектрические волноводы. — М.: Радио и связь, 1988. 248 с.

Л.10. Егоров Ю.В. Частично-заполненные прямоугольные волноводы. — М.: Сов. радио, 1967. 216 с.

Л.11. Майстренко В.К. Радионов А.А., Раевский С.Б. Электродинамический метод расчета коаксиально-полоскового перехода // Техника средств связи. Сер. Радионизмерительная техника, 1992. С. 41-48.

Л.12. Буторин В.М. Связь двух прямоугольных волноводов через круглые отверстия // Радиотехника и электроника. 1993. Т. 38. № 1. С. 95-99.

Л.13. Свешников А.Г. Неполный метод Галеркина // ДАН СССР. 1977. Т. 236. № 5. С. 1076-1079.

Л.14. Ильинский А. С., Слепян Г. Я. Колебания и волны в электродинамических системах с потерями. — М.: МГУ, 1983. 231 с.

Л.15. Каценеленбаум Б.З. Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. М.: Изд-во АН СССР. 1961. 215 с.

Л.16. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / В.В. Никольский, В.П. Орлов, В.Г. Фоккитов и др.; под ред. В.В. Никольского. — М.: Радио и связь, 1982. 272 с.

Л.17. Неганов В.А., Нефедов Е.И., Яровой Г.П. Полосково-щелевые структуры сверх- и крайне-высоких частот. — М.: Наука, 1996. 304 с.

Л.18. Шестопапов В.П., Кирилленко А.А., Масалов С.А. — Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции. — Киев: Наукова думка, 1984. 296 с.

Л.19. Волноводы сложных сечений / Г.Ф. Заргано, В.П. Ляпин, В.С. Михалевский и др. — М.: Радио и связь, 1986. 123 с.

Л.20. Самарский А.А., Тихонов А.Н. О представлении поля в волноводе в виде суммы полей  $TE$  и  $TM$  // Журнал технической физики. 1948. Т. 18. № 7. С. 959-970.

Л.21. Никольский В.В. К обоснованию метода Трефтца для задач дифракции // Труды МИРЭА: Электродинамика, антенны и техника СВЧ. 1974. Вып. 70. С. 3-23.

Л.22. Веселов Г.И. Метод частичных областей для электродинамических задач с некоординатными границами (продольно-регулярные системы). Дисс. ... д-ра техн. наук. — М.: МВТУ, 1971. 350 с.

Л.23. Власов А.Г. Метод переопределенных рядов в некоторых краевых задачах математической физики // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Сб. 3, Л.: Гос. ун-т, 1959. С. 403-462.

Л.24. Прохода И.Г., Чумаченко В.П. Метод частичных пересекающихся областей для исследования волноводно-резонаторных систем сложной формы. // Изв. вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 10. С. 1578-1582.

Л.25. Апельцин В. Ф., Кюркчан А. Г. Аналитические свойства волновых полей. — М.: МГУ, 1990. 208 с.

Л.26. Вайнштейн Л. А., Журав С. М. Сильный скин-эффект на краях тонких металлических пластин // Письма в ЖТФ, 1986. Т. 12. Вып. 12. С. 723-727.

Л.27. Сологуб В.Г. О решении одного интегрального уравнения типа свертки с конечными пределами интегрирования // ЖВМ и МФ. 1971. Т. 11. № 4. С. 837-854.

Л.28. Нефедов Е. И. Электродинамика объемных интегральных схем СВЧ и КВЧ // Радиотехника и электроника, 1993. Т. 38. № 4. С. 593-635.

Л.29. Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. Объемные интегральные схемы СВЧ. — М.: Наука, 1985. 255 с.