

В. А. Неганов, Е. И. Нефёдов, Г. П. Яровой

Современные МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

линий передачи
и резонаторов
сверх- и крайневысоких
частот

**Учебное пособие
для высших учебных
заведений**

Москва
«Педагогика-Пресс»
1998

УДК 537.86
ББК 32.84 я 7
Н 41

Неганов В. А., Нефёдов Е. И., Яровой Г. П.
Н 41 Современные методы проектирования линий передачи и резонаторов сверх- и крайневых частот. — М.: Педагогика-Пресс, 1998. — 328 с.: ил.

ISBN 5-7155-0764-2

Книга посвящена систематическому изложению современных принципов математического аппарата, применяемого при проектировании устройств сверх- и крайневых частот (СВЧ и КВЧ). В книгу включены разделы высшей математики и функционального анализа, отсутствующие в учебной литературе по электродинамике и технике СВЧ и КВЧ. Это сведения по обычным и сингулярным интегральным уравнениям и вариационным формулировкам краевых задач. Особое внимание в работе уделено некоторым некорректно поставленным задачам в электродинамике.

Методы проектирования линий передачи и резонаторов иллюстрируются практически важными примерами расчета. В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. Это методы ортогонализующей подстановки и почти полного обращения оператора.

Для преподавателей вузов, докторантов, аспирантов и студентов старших курсов, специалистов в области радиотехники и радиофизики СВЧ и КВЧ.

УДК 537.86
ББК 32.84 я 7

ISBN 5-7155-0764-2

© Неганов В. А., Нефёдов Е. И.,
Яровой Г. П., 1998

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4
Основные обозначения	7
ГЛАВА 1. Основные положения линейной электродинамики СВЧ и КВЧ диапазонов	9
1.1. Некоторые общие свойства электромагнитного поля.....	9
1.1.1. Уравнения Максвелла. Система единиц. Материальные среды.....	9
1.1.2. Уравнения Максвелла в матричной форме.....	11
1.1.3. Начальные и граничные условия.....	12
1.1.4. Внутренние и внешние задачи электродинамики.....	13
1.2. Формализованная постановка электродинамических задач.....	14
1.3. Разложение электромагнитного поля по плоским волнам.	
Гармонические процессы.....	17
1.4. Функционалы для операторов Максвелла.	
Вариационные принципы.....	19
1.4.1. Определение функционала.....	19
1.4.2. Свободные и вынужденные колебания.....	
1.4.3. Скалярное произведение. Неравенство Коши-Буняковского	20
1.4.4. Типы операторов краевых задач электродинамики.....	20
1.4.5. Оператор Максвелла.....	21
1.4.6. Вариационные принципы электродинамики.....	23
1.5. Проекционные методы решения электродинамических задач.....	23
1.5.1 Ортогональные ряды.....	24
1.5.2. Метод моментов (метод Галёркина).....	25
1.5.3. Метод Бубнова-Галёркина.....	27
1.5.4. Метод Рунца.....	27
1.6. Интегральные уравнения в пространственно-частотном представлении для задач рассеяния, получаемые с помощью теоремы Грина.....	29
1.6.1. Интегральные уравнения. Общие соображения.....	29
1.6.2. Интегральные уравнения. Уравнения Максвелла. Теорема Грина.....	29
1.6.3. Интегральные уравнения и функция Грина.....	30
1.6.4. Некоторые преобразования интегральных уравнений.....	32
1.7. Интегральные уравнения электродинамики, связанные с базисами Трефтца.	
Адмитансные и импедансные интегральные уравнения).....	33
1.7.1. Проекционное наложение граничных условий: процесс Трефтца.....	33
1.7.2. Процесс Трефтца как метод частичных областей.....	34
1.7.3. Адмитансные и импедансные интегральные уравнения.....	35
1.8. Общие сведения об интегральных уравнениях.....	38
1.8.1. Уравнения Фредгольма.....	38
1.8.2. Интегральные уравнения второго рода с вырожденным ядром.....	39
1.8.3. Решение уравнений второго рода с помощью резольвенты.....	40
1.8.4. Метод определителей Фредгольма.....	41
1.8.5. Решение уравнений Фредгольма второго рода	

методом интегральных преобразований.....	42
1.9. Приближённые методы решения интегральных уравнений	
Фредгольма второго рода.....	44
1.9.1 Замена интегральных уравнений	
конечной системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).....	44
1.9.2. Метод замены произвольного ядра вырожденным.....	45
1.9.3. Метод моментов.....	47
1.10. Интегральные уравнения Фредгольма первого рода.	
Некорректные задачи в электродинамике.....	48
1.10.1. Интегральные уравнения Фредгольма первого рода.....	48
1.10.2. Определение.....	48
1.10.3. Метод регуляризации.....	49
1.10.4. Относительная сходимость и проблемы анализа.....	50
1.10.5. Сходимость.....	51
1.10.6. Проблема выбора базисных функций. Условие на ребре.	
Тригонометрические функции.....	52
1.10.7. Полиномы Чебышева. Метод почти полного обращения.	
Вариационный подход.....	53
1.11. Сингулярные интегральные уравнения.....	55
1.11.1. Аналитические функции. Интегралы типа Коши.	
Формулы Сохоцкого-Племеля.....	55
1.11.2. Краевая задача Римана для многосвязной области.	
Сведение к сингулярным уравнениям.....	57
1.11.3. Краевая задача Гильберта. Интегральное уравнение задачи.	
Связь краевых задач Гильберта и Римана.....	58
1.11.4. Сингулярные интегральные уравнения.	
Регуляризация сингулярных интегральных уравнений.....	60
1.11.5. Регуляризация решением характеристического уравнения	
Способ Карлемана-Векуа.....	62
1.12. Задачи и упражнения к главе 1.....	63

ГЛАВА 2. Основы теорий линейных устройств сверх- и крайне	
высоких частот для гармонических процессов.....	70
2.1. Основные определения.....	70
2.1.1. Многополюсник.....	70
2.1.2. Матрицы многополюсников.....	71
2.1.3. Матрица рассеяния.....	72
2.1.4. Матрицы сопротивлений и проводимостей.....	73
2.2. Основные теоремы цепей СВЧ и КВЧ диапазонов.....	73
2.2.1. Теорема Пойнтинга.....	73
2.2.2. Лемма Лоренца для многополюсников.....	75
2.2.3. Теорема Фостера для недиссипативных многополюсников.....	77
2.2.4. Первая эквивалентная схема.....	78
2.2.5. Вторая эквивалентная схема.....	79
2.3. Соотношения между характеристическими матрицами	
многополюсников.....	80
2.3.1. Связь между матрицами \bar{Z} , \bar{Y} , \bar{S}	80
2.3.2. Зависимость матриц многополюсников от нумерации входов.....	81
2.3.3. Сдвиг плоскостей отсчета фаз на входах многополюсника.....	82
2.4. Основные свойства матрицы рассеяния.....	82
2.4.1. Физический смысл элементов матрицы рассеяния.....	82
2.4.2. Симметричность матрицы рассеяния для взаимных устройств.....	82
2.4.3. Унитарность матрицы рассеяния	

для недиссипативных многополюсников.....	83
2.4.4. Коммутативность матрицы рассеяния с матрицей симметрии для симметричных многополюсников.....	83
2.4.5. Преимущества матрицы рассеяния.....	84
2.5. Анализ четырехполюсников каскадной структуры с помощью матриц передачи.....	84
2.6. Метод симметричных восьмиполюсников (метод синфазного и противофазного возбуждений).....	86
2.6.1. Режим холостого хода = синфазное возбуждение.....	86
2.6.2. Режим короткого замыкания = противофазное возбуждение.....	87
2.6.3. Общее решение.....	87
2.6.4. Связь между матрицами.....	87
2.6.5. Схема анализа.....	89
2.7. Матрицы передачи и рассеяния для некоторых широко используемых четырехполюсников.....	89
2.8. Пример использования матрицы рассеяния.....	90
2.8.1. Двойной волноводный тройник.....	90
2.8.2. Свойства двойного волноводного тройника.....	90
2.8.1. Пример.....	93
2.9. Вычисление волновых сопротивлений линии передачи.....	94
2.9.1. Способы введения понятия волнового сопротивления.....	94
2.9.2. Важное примечание.....	94
2.9.3. Волновое сопротивление линии с ТЕМ (Т) волной.....	95
2.9.4. Волновое сопротивление линии с не ТЕМ (Т) волной.....	96
2.9.5. “Энергетическое” определение волнового сопротивления.....	97
2.9.6. Вместо заключения (резюме).....	97
2.10. Задачи и упражнения к главе 2.....	98
ГЛАВА 3. Методы расчета линий передачи.....	102
3.1. Основные характеристики линий передачи.....	102
3.1.1. Определение.....	102
3.1.2. Тип волны, структура электромагнитного поля и критическая частота.....	102
3.1.3. Основы классификации (идентификации) собственных волн в линии.....	104
3.1.4. Основные характеристики (параметры волн в линии).....	104
3.2. Электромагнитные волны в продольно-однородных структурах.....	106
3.2.1. Общее представление поля.....	106
3.2.2. Краевые задачи для двумерного уравнения Гельмгольца.....	108
3.2.3. Собственные векторные функции двумерного оператора Лапласа.....	109
3.3. Решение двумерного уравнения Гельмгольца методом разделения переменных для координатных граничных задач в линиях с однородным заполнением..	110
3.3.1. Метод в декартовой системе координат.....	110
3.3.2. Метод в цилиндрической системе координат.....	112
3.3.3. Краевые задачи для круговой области.....	113
3.3.4. Краевые задачи для части секториальной области.....	114
3.3.5. Вторая краевая задача (для конечного сектора).....	115
3.4. Метод частичных областей анализа и расчёта продольно-однородных линий передачи.....	116
3.4.1. Г-образный волновод с однородным заполнением.....	116
3.4.2. Сингулярное интегральное уравнение.....	118
3.4.3. Частично заполненный прямоугольный волновод.....	119

3.5. Альтернирующий метод Шварца.....	121
3.5.1. <i>Идея метода для задачи Дирихле.....</i>	121
3.5.2. <i>Связь метода Шварца с методом частичных областей.....</i>	123
3.6. Применение приближенных граничных условий для расчета волноведущих структур с тонкими изотропными и анизотропными пленками.....	124
3.6.1. <i>Приближенные двухсторонние граничные условия для анизотропных пленок.....</i>	124
3.6.2. <i>Обоснование применения приближенных двухсторонних граничных условий для расчета волноведущих структур.....</i>	126
3.7. Периодические направляющие структуры.....	128
3.7.1. <i>Теорема Флоке.....</i>	128
3.7.2. <i>Эквивалентная схема бесконечной периодической системы.....</i>	130
3.7.3. <i>Периодические системы конечной длины.....</i>	132
3.8. Метод интегрального уравнения для анализа и расчета периодических волноводных структур на щелевых линиях в Е-плоскости волновода.....	134
3.8.1. <i>Постановка задачи. Сведение краевой задачи к интегральному уравнению.....</i>	134
3.8.2. <i>Периодическая структура с металлической перегородкой.....</i>	137
3.8.3. <i>Структура с металлизированным диэлектриком с двухсторонним рисунком.....</i>	137
3.9. Применение эквивалентных граничных условий при анализе и расчёте периодических структур.....	138
3.9.1. <i>Гофрированно-щелевые линии передачи.....</i>	138
3.9.2. <i>Исследование симметричной гофрированно-щелевой линии передачи.....</i>	141
3.10. Теория возмущений для анализа и расчёта продольно-однородных волноводов с анизотропными включениями.....	143
3.10.1. <i>Квадратичные соотношения для метода возмущений.....</i>	143
3.10.2. <i>Основная формула объемного возмущения продольно-однородного волновода.....</i>	144
3.10.3. <i>Прямоугольный слоистый волновод с намагниченным ферритовым слоем.....</i>	145
3.11. Вариационный метод расчёта постоянных распространения в сложных частично заполненных волноводах.....	148
3.11.1. <i>Вариационные принципы для регулярных волноводов.....</i>	148
3.11.2. <i>Прямоугольный волновод с диэлектрическим стержнем.....</i>	150
3.12. Метод поперечных сечений для анализа и расчёта протяженных неоднородностей в линиях передачи..	153
3.12.1. <i>Изогнутый волновод.....</i>	153
3.12.2. <i>Комплексные амплитуды. Условие ортогональности. Коэффициенты связи.....</i>	155
3.12.3. <i>Важный частный случай. Слабая связь.....</i>	156
3.12.4. <i>Волновод постоянного сечения с переменным заполнением.....</i>	157
3.13. Коаксиальный цилиндрический волновод. Высшие типы волн.....	160
3.13.0. <i>Коаксиальный волновод.....</i>	160
3.13.1. <i>Высшие типы волн регулярного коаксиального кругового волновода. Краевая задача. Электрические и магнитные волны. Характеристические уравнения.....</i>	160
3.13.2. <i>Численное исследование характеристических уравнений.....</i>	161
3.13.3. <i>Несимметричные магнитные волны H_{ms}.....</i>	163

3.13.4. Волны шепчущей галереи.....	164
3.13.5. Разрежение спектра волн коаксиала с большими азимутальными индексами m	164
3.13.6. Приближённые формулы для корней дисперсионных уравнений.....	167
3.13.7. Волны шепчущей галереи и коаксиал.....	167
3.13.8. Аномальное поведение магнитных волн H_m коаксиального волновода	169
3.13.9. Дополнительный материал.....	170
3.14. Задачи и упражнения к главе 3.....	174

ГЛАВА 4. Метод почти полного обращения

сингулярного оператора интегральных уравнений в теории полосково-щелевых структур.....	177
4.1. Общая постановка задачи. Граничные условия. Существование и единственность решения краевой задачи.....	179
4.2. Экранированная волноведущая линия передачи с произвольным числом токопроводящих полосок, расположенных в одной плоскости.....	182
4.2.1. Геометрия задачи. Электромагнитное поле.....	182
4.2.2. Условия на границе с k проводниками. Матрицы адмитансов и импедансов.....	183
4.2.3. Система функциональных уравнений.....	184
4.2.4. Связь между элементами матриц $[Z_{mij}]$ и $[Y_{mij}]$	185
4.3. Интегральные представления для полей в экранированных структурах с токопроводящими полосками, расположенными в одной плоскости.....	188
4.3.1. Разложения по полной системе тригонометрических функций.....	188
4.3.2. Улучшение сходимости. Интегральные представления.....	189
4.3.3. Предельный переход. Полезность интегральных представлений.....	192
4.4. Сингулярные уравнения, получаемые из интегральных представлений. Метод решения.....	193
4.4.1. Связь интегральных представлений с интегральными уравнениями.....	193
4.4.2. Переход к сингулярному интегральному уравнению. Переменные Швингера.....	194
4.4.3. Проблема вычисления полей собственных волн.....	195
4.5. Метод ортогонализирующей подстановки для расчета экранированных полосковых и щелевых линий. Связь с методом почти полного обращения оператора.....	197
4.5.1. Основная идея подхода.....	197
4.5.2. Примеры.....	198
4.5.3. Векторное сингулярное интегральное уравнение.....	198
4.5.4. Система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).....	199
4.5.5. Некоторый итог.....	201
4.6. Вычисление тензоров поверхностных адмитансов для линии передачи на многослойной изотропной подложке.....	201
4.6.1. Экранированная линия передачи.....	201
4.6.2. Важное рекуррентное соотношение.....	203
4.6.3. Изотропный слой на идеально проводящей плоскости.....	204
4.7. Вычисление тензоров поверхностных адмитансов анизотропных и изотропных слоев.....	205
4.7.1. Обобщенная экранированная линия.....	205
4.7.2. Электромагнитное поле.....	206
4.8. Вычисление элементов матриц импеданса для полосковых структур.....	208
4.9. Особенности определения постоянных распространения собственных волн волноведущих структур.....	210

3.13.4. Волны шепчущей галереи.....	164
3.13.5. Разрежение спектра волн коаксиала с большими азимутальными индексами m	164
3.13.6. Приближённые формулы для корней дисперсионных уравнений.....	167
3.13.7. Волны шепчущей галереи и коаксиал.....	167
3.13.8. Аномальное поведение магнитных волн H_{m1} коаксиального волновода	169
3.13.9. Дополнительный материал.....	170
3.14. Задачи и упражнения к главе 3.....	174

ГЛАВА 4. Метод почти полного обращения

сингулярного оператора интегральных уравнений

в теории полосково-щелевых структур.....

4.1. Общая постановка задачи. Граничные условия. Существование и единственность решения краевой задачи.....	179
4.2. Экранированная волноведущая линия передачи с произвольным числом токопроводящих полосок, расположенных в одной плоскости.....	182
4.2.1. Геометрия задачи. Электромагнитное поле.....	182
4.2.2. Условия на границе с k проводниками. Матрицы адмитансов и импедансов.....	183
4.2.3. Система функциональных уравнений.....	184
4.2.4. Связь между элементами матриц $[Z_{mij}]$ и $[Y_{mij}]$	185
4.3. Интегральные представления для полей в экранированных структурах с токопроводящими полосками, расположенными в одной плоскости.....	188
4.3.1. Разложения по полной системе тригонометрических функций.....	188
4.3.2. Улучшение сходимости. Интегральные представления.....	189
4.3.3. Предельный переход. Полезность интегральных представлений.....	192
4.4. Сингулярные уравнения, получаемые из интегральных представлений. Метод решения.....	193
4.4.1. Связь интегральных представлений с интегральными уравнениями.....	193
4.4.2. Переход к сингулярному интегральному уравнению. Переменные Швингера.....	194
4.4.3. Проблема вычисления полей собственных волн.....	195
4.5. Метод ортогонализирующей подстановки для расчета экранированных полосковых и щелевых линий. Связь с методом почти полного обращения оператора.....	197
4.5.1. Основная идея подхода.....	197
4.5.2. Примеры.....	198
4.5.3. Векторное сингулярное интегральное уравнение.....	198
4.5.4. Система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ).....	199
4.5.5. Некоторый итог.....	201
4.6. Вычисление тензоров поверхностных адмитансов для линии передачи на многослойной изотропной подложке.....	201
4.6.1. Экранированная линия передачи.....	201
4.6.2. Важное рекуррентное соотношение.....	203
4.6.3. Изотропный слой на идеально проводящей плоскости.....	204
4.7. Вычисление тензоров поверхностных адмитансов анизотропных и изотропных слоев.....	205
4.7.1. Обобщенная экранированная линия.....	205
4.7.2. Электромагнитное поле.....	206
4.8. Вычисление элементов матриц импеданса для полосковых структур.....	208
4.9. Особенности определения постоянных распространения собственных волн волноведущих структур.....	210

4.9.1. Проблема нахождения постоянных распространения.....	210
4.9.2. Точность расчетов характеристик.....	210
4.9.3. Сравнение результатов.....	211
4.10. Сходимость и оценка погрешности решения.	
Теорема об оценке погрешностей решений	
векторных уравнений Фредгольма второго рода.....	212
4.10.1. Приближенные решения и погрешность.....	212
4.10.2. Сходимость полученного решения.....	215
4.11. Волноводно-щелевая линия передачи.....	216
4.11.2. Волноводно-щелевая линия (ВЩЛ). Функциональные соотношения...	216
4.11.2. Матрица админансов.....	217
4.11.3. Интегральное уравнение.....	219
4.11.4. Система сингулярных интегральных уравнений.....	220
4.11.5. Переход к интегральному уравнению Фредгольма.	
Чётные и нечётные волны.....	221
4.11.6. Дисперсионное уравнение.....	222
4.11.7. Электромагнитное поле.....	224
4.11.8. Некоторые частные случаи.....	224
4.11.9. Нечётные волны. Первое приближение.....	224
4.12. Экранированная несимметричная полосковая линия.....	226
4.12.1. Краевая задача.....	226
4.12.2. Сингулярные интегральные уравнения.....	227
4.12.3. Метод. Уравнения Фредгольма.....	227
4.12.4. Чётные волны.....	228
4.12.5. Дисперсионное уравнение.....	229
4.12.6. Чётные волны.....	229
4.12.7. Оценка точности.....	230
4.12.8. Некоторые результаты.....	230
4.13. Задачи и упражнения к главе 4.....	231
ГЛАВА 5. Методы расчета объемных резонато-	234
ров.....	
5.1. Основные характеристики объемных резонаторов.....	234
5.1.1. Определение.....	234
5.1.2. Основные характеристики резонатора.....	235
5.1.3. Разрежение спектра собственных частот.....	236
5.1.4. Заключительное замечание.....	237
5.2. Общая теория электромагнитных резонаторов.....	237
5.2.1. Резонатор как конечный отрезок однородной линии передачи.....	237
5.2.2. Резонатор на поперечной волне.....	239
5.2.3. Краевые задачи для "произвольного" резонатора.....	239
5.2.4. Учёт потерь. Добротность. Понятие "комплексной" частоты.....	239
5.3. Решение трехмерного уравнения Гельмгольца	
методом разделения переменных.....	240
5.3.1. Метод в декартовой системе координат.....	240
5.3.2. Цилиндрическая система координат.....	241
5.3.3. Сферическая система координат.....	242
5.4. Метод частичных областей	
для анализа резонаторов сложной формы.....	245
5.4.1. Пример. Тороидальный резонатор.....	245
5.4.2. Условие сшивания решений на границе частичных областей.	
Интегральное уравнение.....	246

5.4.3. Приближенное решение.....	247
5.5. Метод возмущений	
для расчета резонаторов с анизотропными включениями.....	248
5.6. Метод сингулярных интегральных уравнений	
в теории секториально-цилиндрических полосково-щелевых резонаторов...	249
5.6.1. Общие соображения.....	249
5.6.2. Интегральные уравнения для анализа секториально-цилиндрических полосково-щелевых резонаторов.....	250
5.6.3. Собственные колебания.....	252
5.6.4. Алгоритм вычисления тензоров поверхностных адмитансов областей цилиндрическо-секториальной формы.....	253
5.6.5. Поверхностный импеданс области.....	254
5.6.7. Уравнение для собственных колебаний секториально-цилиндрического резонатора с одной щелью.....	256
5.6.8. Дисперсионное уравнение.....	257
5.6.9. ТМ-колебания.....	257
5.6.10. Собственные частоты.....	259
5.6.11. Вместо заключения.....	259
5.7. Задачи и упражнения к главе 5.....	260

ГЛАВА 6. Электродинамические методы анализа и расчёта неоднородностей в прямоугольном волноводе 262

6.1. Классификация неоднородностей в прямоугольном волноводе и их эквивалентные схемы.....	262
6.1.1. Штыри в волноводе.....	262
6.1.2. Металлические диафрагмы и поперечные металлические полоски.....	262
6.1.3. Продольные металлические полоски.....	262
6.1.4. Ступеньки в волноводах.....	263
6.2. Индуктивная диафрагма на стыке двух диэлектриков. Метод ортогонализирующей подстановки.....	264
6.2.1. Геометрия задачи.....	264
6.2.2. Диафрагма в волноводе.....	265
6.2.3. Коэффициенты отражения и прохождения.....	267
6.2.4. Электромагнитное поле.....	268
6.2.5. Реактивная проводимость.....	269
6.2.6. Уравнение. Метод.....	269
6.2.7. Квазистатика.....	270
6.2.8. Индуктивная диафрагма. Третье приближение.....	271
6.3. Емкостная диафрагма на стыке двух диэлектриков. Метод ортогонализирующей подстановки.....	272
6.3.1. Емкостная диафрагма.....	272
6.3.2. Дифракция волны H_{10}	272
6.3.3. Коэффициенты отражения и прохождения.....	273
6.3.4. Электромагнитное поле. Интегральное уравнение.....	274
6.3.5. Метод ортогонализирующей подстановки.....	275
6.3.6. Квазистатическое приближение. Коэффициенты отражения и прохождения.....	276
6.4. Индуктивная полоска на стыке двух диэлектриков. Метод сингулярного интегрального уравнения.....	276
6.4.1. Схема анализа.....	276
6.4.2. Сингулярное интегральное уравнение.....	278
6.4.2. Сингулярное интегральное уравнение.....	279

6.4.4. Реактивное сопротивление.....	279
6.5. Емкостная полоска на стыке двух диэлектриков.	
Метод эквивалентной замены центральной полоски	
на несимметричную диафрагму.....	281
6.5.1. Геометрия задачи. Схема анализа.....	281
6.5.2. Замечание.....	281
6.6. Определение погрешностей приближённых решений	
задач дифракции на диафрагмах.....	281
6.6.1. Диафрагма с k щелями в волноводе.....	281
6.6.2. Индуктивная диафрагма в пустом волноводе.....	283
6.6.3. Интегральное уравнение.....	284
6.6.4. Симметричная диафрагма.....	285
6.6.5. Погрешность.....	286
6.6.6. Некоторый итог.....	287
6.7. Метод расчета металлических индуктивных штырей	
малого диаметра в пустом волноводе.....	287
6.7.1. Геометрия задачи. Постановка задачи.....	287
6.7.2. Коэффициенты отражения и прохождения.	
Реактивная проводимость.....	289
6.7.3. Замечание. Улучшение сходимости.....	289
6.8. Расчет резонансного штыря вариационным методом.....	290
6.8.1. Геометрия задачи.....	290
6.8.2. Электрическое поле.....	291
6.8.3. Коэффициент отражения. Сопротивление штыря.	
Вариационный функционал.....	292
6.8.4. Квазистатическое приближение.....	293
6.9. Метод расчета продольных тонкослойных металлических	
неоднородностей в прямоугольном волноводе.....	294
6.9.1. Тонкослойные неоднородности.....	294
6.9.2. Интегральные представления для полей электромагнитных волн	
в волноводящих структурах с металлическими неоднородностями.....	294
6.9.3. Коэффициенты прохождения и отражения.....	296
6.9.4. Исследование ядра интегрального уравнения.....	296
6.9.5. Продольная металлическая полоска в пустом волноводе.	
Коэффициенты прохождения и отражения.....	297
6.9.6. Итог.....	298
6.10. Н-плоскостное ступенчатое сочленение	
двух прямоугольных волноводов.....	299
6.10.1. Схема и геометрия.....	299
6.10.2. Электрическое поле.....	299
6.10.3. Коэффициенты отражения и прохождения.	
Стационарный функционал.....	300
6.10.4. Вместо заключения.....	301
6.11. Задачи и упражнения к главе 6.....	301
Литература.....	303
Авторский и предметный указатель.....	306