

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

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
УСТРОЙСТВ СВЧ И АНТЕНН**

Под редакцией Неганова В.А.

**Учебное пособие
для высших учебных
заведений**

Москва



«Радио и связь»

2002

ББК 32.84

Н41

УДК 537.87 (075.8)

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

- Н41 Электродинамические методы проектирования устройств СВЧ и антенн. Учебное пособие для вузов/ Под. ред. Неганова В.А. – М.: Радио и связь, 2002. – 416 с., 125 ил.

ISBN 5-256-01663-6

Книга посвящена систематическому изложению современных принципов математического аппарата, применяемого при проектировании антенн и устройств сверх- и крайневысоких 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, вариационным формулировкам краевых задач. Особое внимание в книге уделено некорректно поставленным задачам в электродинамике.

Методы проектирования антенн и устройств СВЧ и КВЧ иллюстрируются практически важными примерами расчета. В книгу вошёл оригинальный материал, полученный авторами. Это методы ортогонализирующей подстановки и частичного обращения интегрального оператора.

Для преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, студентов обучающихся по радиотехническим и радиофизическим специальностям.

Табл. 5. Ил. 125. Библиогр. 84 назв.

Рецензенты: Бей Н.А. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Митрохин В.Н. (МГТУ им. Н.Э. Баумана), Раевский С.Б. (Нижегородский государственный технический университет)

ISBN 5-256-01663-6

© Неганов В.А., Нефёдов Е.И.,
Яровой Г.П., 2002

© Издательство «Радио и связь», 2002

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Основные обозначения	8
Список условных сокращений	11

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ СВЧ И КВЧ ДИАПАЗОНОВ..... 12

1.1. Некоторые общие свойства электромагнитного поля.	13
1.1.1. Уравнения Максвелла. Система единиц. Материальные среды.	13
1.1.2. Уравнения Максвелла в матричной форме.	15
1.1.3. Начальные и граничные условия.	16
1.1.4. Внутренние и внешние задачи электродинамики.	17
1.2. Формализованная постановка электродинамических задач.	18
1.3. Разложение электромагнитного поля по плоским волнам. Гармонические процессы.	21
1.3.1. Разложение по плоским волнам.	21
1.3.2. Комплексные амплитуды векторов.	23
1.4. Функционалы для операторов Максвелла. Вариационные принципы.	23
1.4.1. Определение функционала.	23
1.4.2. Свободные и вынужденные колебания.	24
1.4.3. Скалярное произведение. Неравенство Коши-Буняковского.	24
1.4.4. Типы операторов краевых задач электродинамики.	25
1.4.5. Оператор Максвелла.	26
1.4.6. Вариационные принципы электродинамики.	28
1.5. Проекционные методы решения электродинамических задач.	29
1.5.1. Ортогональные ряды.	29
1.5.2. Метод моментов (метод Галеркина).	31
1.5.3. Метод Бубнова-Галеркина.	33
1.5.4. Метод Ритца.	34
1.6. Интегральные уравнения в пространственно-частотном представлении для задач рассеяния, получаемые с помощью теоремы Грина.	35
1.6.1. Интегральные уравнения. Общие соображения.	35
1.6.2. Интегральные уравнения. Уравнения Максвелла. Теорема Грина.	36
1.6.3. Интегральные уравнения и функция Грина.	37
1.6.4. Некоторые преобразования интегральных уравнений.	39
1.7. Интегральные уравнения электродинамики, связанные с базисами Трефтца (адмитансные и импедансные интегральные уравнения).	40

1.7.1. Проекционное наложение граничных условий: процесс Трэфтца . . .	40
1.7.2. Процесс Трэфтца как метод частичных областей	42
1.7.3. Адмитансные и импедансные интегральные уравнения	44
1.8. Общие сведения об интегральных уравнениях.	47
1.8.1. Уравнения Фредгольма.	47
1.8.2. Интегральные уравнения второго рода с вырожденным ядром	48
1.8.3. Решение уравнений второго рода с помощью резольвенты	49
1.8.4. Метод определителей Фредгольма.	50
1.8.5. Решение уравнений Фредгольма второго рода методом интегральных преобразований	52
1.9. Приближенные методы решения интегральных уравнений Фредгольма второго рода.	54
1.9.1. Замена интегрального уравнения конечной системой линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)	54
1.9.2. Метод замены произвольного ядра вырожденным.	55
1.9.3. Метод моментов.	56
1.10. Интегральные уравнения Фредгольма первого рода. Некорректные задачи в электродинамике	57
1.10.1. Интегральные уравнения Фредгольма первого рода.	57
1.10.2. Определение.	58
1.10.3. Методы регуляризации.	59
1.10.4. Относительная сходимость. Проблема анализа.	60
1.10.5. Сходимость.	61
1.10.6. Проблема выбора базисных функций. Условие на ребре. Тригонометрические функции.	63
1.10.7. Полиномы Чебышева. Метод частичного обращения оператора. Вариационный подход.	64
1.11. Сингулярные интегральные уравнения.	66
1.11.1. Аналитические функции. Интегралы типа Коши. Формулы Сохоцкого-Племеля.	67
1.11.2. Краевая задача Римана для многосвязной области. Сведение к сингулярным уравнениям.	68
1.11.3. Краевая задача Гильберта. Интегральное уравнение задачи. Связь краевых задач Гильберта и Римана.	69
1.11.4. Сингулярные интегральные уравнения. Регуляризация сингулярных уравнений.	72
1.11.5. Регуляризация решением характеристического уравнения (способ Карлемана-Векуа).	74
1.12. Задачи и упражнения к главе 1.	75

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЛИНЕЙНЫХ УСТРОЙСТВ СВЕРХ- И КРАЙНЕВЫСОКИХ ЧАСТОТ (СВЧ и КВЧ) ДЛЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	84
2.1. Основные определения.....	85
2.1.1. Многополюсник.....	85
2.1.2. Матрицы многополюсников.....	85
2.1.3. Матрица рассеяния.....	87
2.1.4. Матрицы сопротивлений и проводимостей.....	87
2.2. Основные теоремы цепей СВЧ и КВЧ диапазонов.....	88
2.2.1. Теорема Умова-Пойнтинга.....	88
2.2.2. Лемма Лоренца для многополюсников.....	90
2.2.3. Теорема Фостера для недиссипативных многополюсников.....	92
2.2.4. Первая эквивалентная схема.....	93
2.2.5. Вторая эквивалентная схема.....	94
2.3. Соотношения между характеристическими матрицами многополюсника.....	96
2.3.1. Связь между матрицами $\bar{Z}, \bar{Y}, \bar{S}$	96
2.3.2. Зависимость матриц многополюсников от нумерации входов.....	96
2.3.3. Сдвиг плоскостей отсчета фаз на входах многополюсника.....	97
2.4. Основные свойства матрицы рассеяния.....	98
2.4.1. Физический смысл элементов матрицы рассеяния.....	98
2.4.2. Симметричность матрицы рассеяния для взаимных устройств.....	98
2.4.3. Унитарность матрицы рассеяния для недиссипативных многополюсников.....	99
2.4.4. Коммутируемость матрицы рассеяния с матрицей симметрии для симметричных многополюсников.....	99
2.4.5. Преимущества матрицы рассеяния.....	100
2.5. Анализ четырехполюсников каскадной структуры с помощью матриц передачи.....	100
2.6. Метод симметричных восьмиполюсников (метод синфазного и противофазного возбуждений).....	103
2.6.1. Режим холостого хода (синфазное возбуждение).....	103
2.6.2. Режим короткого замыкания (противофазное возбуждение).....	104
2.6.3. Общее решение.....	104
2.6.4. Связь между матрицами.....	105
2.6.5. Схема анализа.....	105
2.7. Матрицы передачи и рассеяния для некоторых широко используемых четырехполюсников.....	106
2.8. Пример использования матрицы рассеяния.....	107
2.8.1. Двойной волноводный тройник.....	107
2.8.2. Свойства двойного волноводного тройника.....	107

2.8.3. Пример.....	110
2.9. Вычисление волновых сопротивлений линий передачи.....	112
2.9.1. Способы введения волнового сопротивления.....	112
2.9.2. Важное примечание.....	112
2.9.3. Волновое сопротивление линии с ТЕМ (Т) волной	112
2.9.4. Волновое сопротивление линии с не ТЕМ (Т) волной.....	113
2.9.5. “Энергетическое” определение волнового сопротивления	115
2.9.6. Резюме	115
2.10. Расчет волновых сопротивлений полосково-щелевых линий передачи ...	116
2.10.1. Алгоритм расчета волновых сопротивлений волноводно-щелевых линий передачи.....	116
2.10.2. Алгоритм расчета волновых сопротивлений экранированных полос- ковых линий передачи.....	118
2.11. Задачи и упражнения к главе 2.....	121

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ 127

3.1. Основные характеристики линии передачи	127
3.1.1. Классификация волноведущих структур	127
3.1.2. Классификация собственных волн линий	128
3.1.3. Основные характеристики (параметры) волн в линии	129
3.2. Электромагнитные волны в продольно-однородных структурах	131
3.2.1. Общее представление поля	131
3.2.2. Краевые задачи для двумерного уравнения Гельмгольца	133
3.2.3. Классы волн. Волны Т	134
3.2.4. Быстрые и медленные волны	136
3.2.5. Волны Е и Н в структурах с однородной средой	137
3.2.6. Т-волны в структурах с однородной средой	138
3.3. Решение двумерного уравнения Гельмгольца методом разделения пере- менных для координатных граничных задач с однородным заполнением ...	139
3.3.1. Метод в декартовой системе координат	139
3.3.2. Метод в цилиндрической системе координат	141
3.3.3. Краевые задачи для круговой области	142
3.3.4. Краевые задачи для части секториальной области	143
3.3.5. Вторая краевая задача для части секториальной области	144
3.3.6. Коаксиальный волновод	145
3.4. Метод частичных областей расчета продольно-однородных линий переда- чи	145
3.4.1. Г-образный волновод с продольно-однородным заполнением	146
3.4.2. Частично заполненный прямоугольный волновод	149

3.5. Альтернирующий метод Шварца	152
3.5.1. Идея метода для задачи Дирихле	152
3.5.2. Связь метода Шварца с методом частичных областей (МЧО)	153
3.6. Применение приближенных граничных условий для расчета волноведущих структур с тонкими изотропными и анизотропными пленками	154
3.6.1. Приближенные двухсторонние граничные условия для анизотропных пленок	154
3.6.2. Обоснование применения приближенных двухсторонних граничных условий для расчета волноведущих структур	157
3.7. Периодические направляющие структуры	159
3.7.1. Теорема Флоке	160
3.7.2. Эквивалентная схема бесконечной периодической системы	162
3.7.3. Периодические системы конечной длины	163
3.8. Метод интегрального уравнения для анализа и расчета периодических волноводных структур на щелевых линиях в Е-плоскости волновода	165
3.8.1. Постановка задачи. Сведение краевой задачи к интегральному уравнению	166
3.8.2. Периодическая структура с металлической перегородкой	168
3.8.3. Структура с металлизированным диэлектриком с двусторонним рисунком	169
3.9. Применение эквивалентных граничных условий при расчете периодических структур	170
3.9.1. Гофрированно-щелевые линии передачи	171
3.9.2. Исследование симметричной гофрированно-щелевой линии передачи	174
3.10. Теория возмущений для анализа и расчета продольно-однородных волноводов с анизотропными включениями	176
3.10.1. Квадратичные соотношения для метода возмущений	176
3.10.2. Основная формула объемного возмущения продольно-однородного волновода	177
3.10.3. Прямоугольный слоистый волновод с намагниченным ферритовым слоем	179
3.11. Вариационный метод расчета постоянных распространения сложных частично заполненных волноводов	182
3.11.1. Вариационные принципы для регулярных волноводов	182
3.11.2. Прямоугольный волновод с диэлектрическим стержнем	185
3.12. Метод поперечных сечений для анализа и расчета протяженных неоднородностей в линиях передачи	187
3.12.1. Изогнутый волновод	187
3.12.2. Комплексные амплитуды. Условие ортогональности. Коэффициенты связи	189
3.12.3. Важный частный случай. Слабая связь	191

3.12.4. Волновод постоянного сечения с переменным заполнением ϵ и μ	191
3.14. Задачи и упражнения к главе 3	195

ГЛАВА 4. МЕТОД ЧАСТИЧНОГО ОБРАЩЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАТОРА В ТЕОРИИ ПОЛОСКОВО-ЩЕЛЕВЫХ СТРУКТУР 199

4.1. Общая постановка задачи. Граничные условия. Существование и единственность решения краевой задачи	202
4.2. Экранированная волноведущая структура с произвольным числом токопроводящих полосок, расположенных в одной плоскости	204
4.3. Интегральные представления полей собственных волн экранированных структур с токопроводящими полосками, расположенными в одной плоскости ..	210
4.4. Сингулярные уравнения, получаемые из интегральных представлений. Метод решения	215
4.5. Метод ортогонализирующей подстановки для расчета экранированных полосковых и щелевых линий передачи. Связь с методом частичного обращения оператора	220
4.6. Вычисление тензоров поверхностных адмитансов для линии передачи на многослойной изотропной подложке	224
4.7. Вычисление тензоров поверхностных адмитансов анизотропных и гиротропных слоев	228
4.8. Вычисление элементов матриц импеданса для полосковых структур	232
4.9. Особенности определения постоянных распространения собственных волн волноведущих структур	233
4.10. Сходимость и оценка погрешности решений. Теорема об оценке погрешностей решений векторных уравнений Фредгольма второго рода	235
4.11. Волноводно-щелевая линия передачи	239
4.12. Экранированная несимметричная полосковая линия	250
4.13. Задачи и упражнения к главе 4	257

ГЛАВА 5. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРОВ 261

5.1. Основные характеристики объемных резонаторов	261
5.1.1. Определения	261
5.1.2. Основные характеристики резонатора	262
5.1.3. Разрежение спектра собственных частот	263
5.2. Общая теория электромагнитных резонаторов	265
5.2.1. Резонатор как конечный отрезок однородной линии передачи	265
5.2.2. Резонатор на поперечной волне	266

5.2.3. Краевые задачи для “произвольного” резонатора	267
5.2.4. Учет потерь. Добротность. Понятие “комплексной” частоты	267
5.3. Решение трехмерного уравнения Гельмгольца методом разделения переменных	268
5.3.1. Метод в декартовой системе координат	269
5.3.2. Цилиндрическая система координат	270
5.3.3. Сферическая система координат	271
5.4. Метод частичных областей для анализа резонаторов сложной формы	273
5.4.1. Пример. Тороидальный резонатор	273
5.4.2. Условия “сшивания” решений на границе частичных областей. Интегральное уравнение	275
5.4.3. Приближенное решение	275
5.5. Метод возмущений для расчета резонаторов с анизотропными включениями	276
5.6. Метод сингулярных интегральных уравнений в теории секториально-цилиндрических полосково-щелевых резонаторов	278
5.6.1. Общие соображения	278
5.6.2. Интегральные уравнения для анализа секториально-цилиндрических полосково-щелевых резонаторов	279
5.6.3. Собственные колебания	281
5.6.4. Алгоритм вычисления тензоров поверхностных адмитансов областей цилиндрическо-секториальной формы	283
5.6.5. Поверхностный импеданс области	284
5.6.6. Уравнения для собственных колебаний секториально-цилиндрического резонатора с одной щелью	286
5.6.7. Дисперсионные уравнения	288
5.7. Задачи и упражнения к главе 5	290

ГЛАВА 6. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ 293

6.1. Классификация неоднородностей в прямоугольном волноводе и их эквивалентные схемы	293
6.1.1. Штыри в волноводе	293
6.1.2. Металлические диафрагмы и поперечные металлические полосы	293
6.1.3. Продольные металлические полосы	295
6.1.4. Ступеньки в волноводах	295
6.2. Индуктивная диафрагма на стыке двух диэлектриков. Метод ортогонализующей подстановки	297
6.2.1. Геометрия задачи	297
6.2.2. Диафрагма в волноводе	297
6.2.3. Коэффициенты отражения и прохождения	298

6.2.4. Электромагнитное поле	298
6.2.5. Реактивная проводимость	299
6.2.6. Интегральное уравнение	300
6.2.7. Квазистатика	301
6.2.8. Индуктивная диафрагма. Третье приближение	302
6.3. Емкостная диафрагма на стыке двух диэлектриков. Метод ортогонализирующей подстановки	304
6.3.1. Емкостная диафрагма	304
6.3.2. Дифракция волны H_{10}	304
6.3.3. Коэффициенты отражения и прохождения	305
6.3.4. Электромагнитное поле. Интегральное уравнение	306
6.3.5. Метод ортогонализирующей подстановки	307
6.3.6. Квазистатическое приближение. Коэффициенты отражения и прохождения	308
6.4. Индуктивная полоска на стыке двух диэлектриков. Метод сингулярного интегрального уравнения	309
6.4.1. Схема анализа	309
6.4.2. Сингулярное интегральное уравнение	311
6.4.3. Квазистатическое решение	311
6.4.4. Реактивное сопротивление	312
6.5. Емкостная полоска на стыке двух диэлектриков. Метод эквивалентной замены центральной полоски на несимметричную диафрагму	313
6.5.1. Геометрия задачи. Схема анализа	313
6.6. Определение погрешности приближенных решений задач дифракции на диафрагмах	315
6.6.1. Диафрагма с k щелями в волноводе	315
6.6.2. Индуктивная диафрагма в пустом волноводе	316
6.6.3. Интегральное уравнение	317
6.6.4. Симметричная диафрагма	317
6.7. Метод расчета металлических индуктивных штырей малого диаметра в пустом волноводе	319
6.7.1. Геометрия и постановка задачи	319
6.7.2. Коэффициенты отражения и прохождения. Реактивная проводимость	321
6.7.3. Замечание. Улучшение сходимости	322
6.8. Расчет резонансного штыря вариационным методом	323
6.8.1. Геометрия задачи	323
6.8.2. Электрическое поле	323
6.8.3. Коэффициент отражения. Сопротивление штыря. Вариационный функционал	324
6.8.4. Квазистатическое приближение	327

6.9. Метод расчета продольных тонкослоистых металлических неоднородностей в прямоугольном волноводе	327
6.9.1. Тонкослоистые неоднородности	327
6.9.2. Интегральные представления для полей электромагнитных волн в волноведущих структурах с металлическими неоднородностями	328
6.9.3. Коэффициенты прохождения T и отражения R	330
6.9.4. Исследование ядра интегрального уравнения	330
6.9.5. Продольная металлическая полоска в пустом волноводе. Коэффициенты прохождения и отражения	331
6.9.6. Итог	333
6.10. Н-плоскостное ступенчатое сочленение двух прямоугольных волноводов	333
6.10.1. Схема и геометрия	333
6.10.2. Электрическое поле	334
6.10.3. Коэффициенты отражения и прохождения. Стационарный функционал	334
6.11. Задачи и упражнения к главе 6	336

ГЛАВА 7. СИНГУЛЯРНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ГРИНА СВОБОДНОГО ПРОСТРАНСТВА ОТ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА БЕСКОНЕЧНО ПРОТЯЖЕННОМ ПОЛОМ МЕТАЛЛИЧЕСКОМ ЦИЛИНДРЕ 338

7.1. Функция Грина в декартовой системе координат	338
7.2. Функция Грина в цилиндрической системе координат	341
7.3. Первое сингулярное представление функции Грина в цилиндрической системе координат	345
7.4. Второе сингулярное представление функции Грина в цилиндрической системе координат	352
7.5. Численные результаты сравнения различных представлений функции Грина	355

ГЛАВА 8. СИНГУЛЯРНЫЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ В ТЕОРИИ ТРУБЧАТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВИБРАТОРОВ 362

8.1. Постановка задачи. Уравнение Поклингтона для тонкого электрического вибратора	362
8.2. Вывод сингулярного интегрального уравнения для трубчатого вибратора из уравнений Максвелла	364
8.3. Вывод второго сингулярного интегрального уравнения для трубчатого электрического вибратора из обобщенного уравнения Поклингтона	369

8.4. Вывод третьего сингулярного интегрального уравнения для трубчатого вибратора из обобщенного уравнения Поклингтона	372
8.5. Сравнение сингулярных интегральных уравнений	374
8.6. Метод решения сингулярных интегральных уравнений	375
8.7. Электродинамический анализ симметричного электрического вибратора	380
8.8. Электродинамический анализ несимметричного электрического вибратора	387
Литература	393
Предметный указатель	398