

В. А. Неганов
Д. С. Ключев
Д. П. Табаков

УСТРОЙСТВА СВЧ И АНТЕННЫ

Проектирование,
конструктивная реализация,
примеры применения
устройств СВЧ



URSS

**Неганов Вячеслав Александрович,
Клюев Дмитрий Сергеевич,
Табаков Дмитрий Петрович**

Устройства СВЧ и антенны. Ч. I: Проектирование, конструктивная реализация, примеры применения устройств СВЧ / Под ред. В. А. Неганова. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. — 608 с.

В первой части настоящего учебника рассматриваются методы проектирования и конструктивной реализации устройств СВЧ: линий передачи различных видов, резонаторов, фильтров, фазовращателей, аттенюаторов, тройниковых соединений, направленных ответвителей, различных мостовых соединений, ферритовых устройств (вентилей, циркуляторов, фазовращателей) и СВЧ-устройств на полупроводниковых диодах. Приводятся примеры применения устройств СВЧ в радиосвязи, радиолокации, в измерительной аппаратуре и т. д.

Во второй части рассмотрены основные разделы теории и техники антенн. Освещены вопросы расчета и построения различных типов антенн (от вибраторных до рупорных и антенных решеток, включая фазированные). Основное внимание уделено антеннам СВЧ и расчетам их электромагнитных полей в ближней зоне, что очень важно при решении задач электромагнитной совместимости.

В книгу вошел оригинальный материал, полученный авторами. В частности, описан метод физической регуляризации (самосогласованный метод) расчетов электромагнитного поля антенн, позволяющий осуществлять непрерывный переход с излучающей поверхности антенны к пространству вне ее.

Учебник предназначен для студентов специальностей: 210400 «Радиотехника» и 210601 «Радиоэлектронные системы и комплексы». Может быть использован разработчиками СВЧ-аппаратуры и антенно-фидерных устройств.

Рецензент:

зав. кафедрой физики и техники оптической связи
Нижегородского государственного технического университета,
заслуженный деятель науки РФ,
д-р техн. наук, проф. *С. Б. Раевский*

Издательство «Книжный дом «ЛИБРОКОМ»». 117335, Москва, Нахимовский пр-т, 56.
Формат 60×90/16. Печ. л. 38. Зак. № ЗХ-60.

Отпечатано в ООО «ЛЕНАНД». 117312, Москва, пр-т Шестидесятилетия Октября, 11А, стр. 11.

Содержание

| | |
|--------------------------------------|----|
| Предисловие..... | 3 |
| Список используемых сокращений..... | 7 |
| Список используемых обозначений..... | 9 |
| Введение..... | 14 |

Часть I. Устройства СВЧ.....34

Глава 1. Линии передачи СВЧ34

| | |
|---|----|
| 1.1. Основные параметры линий передачи..... | 36 |
| 1.1.1. Понятие собственных волн линий передачи..... | 36 |
| 1.1.2. Основные характеристики собственных волн линии..... | 38 |
| 1.1.3. Вычисление волновых сопротивлений линий передачи..... | 43 |
| 1.2. Длинные линии..... | 47 |
| 1.2.1. Дифференциальные уравнения длинной линии..... | 47 |
| 1.2.2. Основные параметры длинной линии..... | 49 |
| 1.3. Прямоугольные и круглые волноводы..... | 51 |
| 1.3.1. Структуры электромагнитных полей собственных волн прямоугольного волновода..... | 51 |
| 1.3.2. Структуры электромагнитных полей собственных волн круглого волновода..... | 55 |
| 1.3.3. Основная волна прямоугольного волновода..... | 59 |
| 1.3.4. Затухание волн в круглых и прямоугольных волноводах..... | 61 |
| 1.3.5. Предельная мощность в прямоугольном и круглом волноводах..... | 67 |
| 1.3.6. Определение размеров поперечных сечений прямоугольного и круглого волноводов..... | 70 |
| 1.3.7. Волноводы сложной формы поперечного сечения..... | 71 |
| 1.3.8. Эллиптические волноводы..... | 73 |
| 1.4. Коаксиальные волноводы..... | 76 |
| 1.5. Проволочные линии передачи..... | 80 |
| 1.6. Полосковые линии передачи..... | 81 |
| 1.6.1. Собственные волны полосковых линий..... | 82 |
| 1.6.2. Симметричная полосковая линия (СПЛ)..... | 85 |

| | |
|--|-----|
| 1.6.3. Микрополосковая линия (МПЛ)..... | 87 |
| 1.6.4*. Симметричная щелевая линия (СЩЛ)..... | 89 |
| 1.6.5*. Компланарные линии..... | 92 |
| 1.6.6*. Четные и нечетные собственные волны связанных полосковых линий..... | 96 |
| 1.6.7*. Связанные микрополосковые линии (СМПЛ)..... | 99 |
| 1.6.8*. Волноводно-щелевые линии передачи (ВЩЛ)..... | 101 |
| 1.7. Линии передачи на поверхностных волнах..... | 104 |
| 1.7.1. Однопроводная и диэлектрическая линии передачи..... | 104 |
| 1.7.2. Замедляющие структуры..... | 112 |

Глава 2. Теория отрезков регулярных линий передачи в приближении эквивалентной длинной линии..... 115

| | |
|---|-----|
| 2.1. Эквивалентность бесконечно протяженных линий передачи с Т-, Н- и Е-волнами длинной линии..... | 115 |
| 2.2. Физическая и математическая модели отрезка регулярной линии передачи СВЧ (модель отрезка эквивалентной длинной линии)..... | 118 |
| 2.2.1. Нормированные напряжения для бегущих волн..... | 119 |
| 2.2.2. Коэффициент отражения..... | 121 |
| 2.2.3. Полные нормированные напряжения и токи в линии передачи..... | 122 |
| 2.2.4. Нормированные сопротивление и проводимость эквивалентной длинной линии..... | 124 |
| 2.2.5. Ненормированные напряжение и ток в линиях передачи с Т-волнами..... | 124 |
| 2.3. Частично стоячие волны в эквивалентной длинной линии и коэффициент стоячей волны..... | 126 |
| 2.4. Режимы работы эквивалентной длинной линии передачи без потерь..... | 128 |
| 2.4.1. Короткозамкнутая линия передачи..... | 130 |
| 2.4.2. Разомкнутая линия передачи..... | 131 |
| 2.4.3. Линия без потерь, нагруженная на нормированное реактивное сопротивление..... | 132 |
| 2.4.4. Входное нормированное сопротивление линии, нагруженной на активное сопротивление..... | 133 |
| 2.4.5. Входное нормированное сопротивление линии, нагруженной на произвольное комплексное сопротивление..... | 136 |

| | |
|--|-----|
| 2.4.6. Зависимость входного нормированного сопротивления регулярной линии передачи от коэффициента отражения | 136 |
| 2.4.7. Основные результаты теории эквивалентной длинной линии | 137 |
| 2.4.8. Эквивалентная схема отрезка регулярной линии передачи | 138 |
| 2.5. Коэффициент полезного действия эквивалентной длинной линии передачи с потерями | 139 |

Глава 3. Согласующе-трансформирующие цепи СВЧ-устройств.....141

| | |
|---|-----|
| 3.1. Общие вопросы согласования..... | 141 |
| 3.1.1. Физическая и математическая модели согласования..... | 141 |
| 3.1.2. Уменьшение максимально допустимой величины мощности, передаваемой в нагрузку | 144 |
| 3.1.3. Методы согласования..... | 145 |
| 3.2. Узкополосное согласование тракта СВЧ..... | 146 |
| 3.2.1. Четвертьволновый трансформатор | 147 |
| 3.2.2. Последовательный шлейф..... | 150 |
| 3.2.3. Параллельный шлейф..... | 151 |
| 3.2.4. Два и три последовательных или параллельных шлейфа | 152 |
| 3.3*. Широкополосное согласование тракта СВЧ..... | 155 |
| 3.3.1. Постановка задачи широкополосного согласования..... | 155 |
| 3.3.2. Задача аппроксимации..... | 156 |
| 3.3.3. Трансформация конечного импеданса | 157 |
| 3.3.4. Идеальная наклонная амплитудно-частотная характеристика..... | 158 |
| 3.3.5. Аппроксимация АЧХ с постоянным логарифмическим наклоном при целом ν | 159 |
| 3.3.6. Теоретические ограничения полосы согласования..... | 159 |

Глава 4. Элементы и узлы волноводных СВЧ-трактов и интегральных схем СВЧ.....161

| | |
|---|-----|
| 4.1. Изоляторы для коаксиального тракта | 161 |
| 4.2. Соединители волноводных трактов СВЧ..... | 162 |

| | |
|--|-----|
| 4.2.1. Соединения прямоугольных и круглых волноводов..... | 164 |
| 4.2.2. Соединения коаксиальных волноводов..... | 168 |
| 4.3. Изгибы, повороты и скрутки линий передачи..... | 170 |
| 4.4. Короткозамыкающие поршни в волноводных трактах..... | 173 |
| 4.5. Переходы..... | 175 |
| 4.5.1. Переходы для широкополосного согласования..... | 175 |
| 4.5.2. Переходы с одного типа линии передачи на другой.... | 176 |
| 4.6. Нагрузки..... | 185 |
| 4.7. Реактивные элементы волноводных линий передачи..... | 189 |
| 4.8. Управляющие и ферритовые устройства СВЧ..... | 193 |
| 4.8.1. Классификация управляющих устройств СВЧ..... | 193 |
| 4.8.2. Механические коммутаторы, фазовращатели и аттенюаторы..... | 195 |
| 4.9*. Антенные переключатели на газовых разрядниках..... | 199 |
| 4.10. Элементы интегральных схем СВЧ..... | 201 |
| 4.10.1. Переходы и короткозамыкатели для интегральных СВЧ-модулей..... | 202 |
| 4.10.2. Емкости, индуктивности и резисторы в СВЧ-микросхемах..... | 209 |
| 4.10.3. Резонаторы на микрополосковых и щелевых линиях, диэлектрических структурах..... | 218 |
| 4.10.4. Неоднородности в интегральных схемах СВЧ..... | 225 |

Глава 5. Теория линейных устройств СВЧ.....228

| | |
|--|-----|
| 5.1. Основные определения..... | 228 |
| 5.1.1. Многополюсник..... | 228 |
| 5.1.2. Характеристические матрицы многополюсников..... | 229 |
| 5.1.3. Матрица рассеяния..... | 231 |
| 5.1.4. Матрицы нормированных сопротивлений и проводимостей..... | 232 |
| 5.1.5. Связь между нормированными и ненормированными матрицами сопротивлений и проводимостей..... | 232 |
| 5.2*. Основные теоремы цепей СВЧ..... | 234 |
| 5.2.1. Теорема Умова-Пойнтинга..... | 234 |
| 5.2.2. Лемма Лоренца для многополюсников..... | 236 |
| 5.2.3. Теорема Фостера для недиссипативных многополюсников..... | 237 |
| 5.3. Соотношения между характеристическими матрицами многополюсника..... | 242 |

| | |
|---|-----|
| 5.3.1. Связь между матрицами $[\bar{Z}]$, $[\bar{Y}]$, $[S]$ | 242 |
| 5.3.2. Зависимость матриц многополюсника от нумерации входов..... | 243 |
| 5.3.3. Сдвиг плоскостей отсчета фаз на входах многополюсника..... | 244 |
| 5.4. Основные свойства матрицы рассеяния..... | 244 |
| 5.4.1. Физический смысл элементов матрицы рассеяния..... | 246 |
| 5.4.2. Симметричность матрицы рассеяния для взаимных устройств..... | 249 |
| 5.4.3. Унитарность матрицы рассеяния недиссипативных многополюсников..... | 250 |
| 5.4.4. Коммутируемость матрицы рассеяния $[S]$ с матрицей симметрии $[G]$ для симметричных многополюсников..... | 251 |
| 5.4.5. Преимущества матрицы рассеяния..... | 252 |
| 5.5*. Собственные значения и собственные векторы характеристической матрицы рассеяния..... | 252 |
| 5.5.1. Собственные значения матрицы рассеяния..... | 252 |
| 5.5.2. Собственные векторы матрицы рассеяния..... | 254 |
| 5.5.3. Диагонализация матрицы рассеяния..... | 255 |
| 5.5.4. Матрица рассеяния четырехполюсника..... | 256 |
| 5.5.5. Собственные значения и собственные векторы характеристических матриц $[\bar{Z}]$ и $[\bar{Y}]$ | 259 |
| 5.6. Анализ четырехполюсников каскадной структуры с помощью матриц передачи..... | 260 |
| 5.7. Метод симметричных восьмиполюсников (метод синфазного и противофазного возбуждений)..... | 263 |
| 5.8. Пример использования матрицы рассеяния..... | 263 |
| 5.8.1. Двойной волноводный тройник..... | 263 |
| 5.8.2. Свойства двойного волноводного тройника..... | 264 |
| 5.9. Определение числа параметров, необходимых для описания многополюсника СВЧ..... | 266 |
| 5.9.1. Элементы характеристических матриц..... | 266 |
| 5.9.2. Примеры..... | 267 |

Глава 6. Двухполюсные (оконечные) устройства271

| | |
|--|-----|
| 6.1. Основные свойства..... | 271 |
| 6.2. Загораживающие поршни в волноводах..... | 273 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.1. Подвижные контактные поршни | 274 |
| 6.2.2. Подвижные бесконтактные поршни | 274 |
| 6.3. Согласованные нагрузки | 279 |
| 6.4* Индикаторы СВЧ мощности | 280 |
| 6.4.1. Кристаллические детекторы | 281 |
| 6.4.2. Болометры и термисторы | 284 |

Глава 7. Четырехполюсные устройства СВЧ286

| | |
|--|-----|
| 7.1. Основные свойства | 286 |
| 7.1.1. Характеристические матрицы | 286 |
| 7.1.2. Нагруженный четырехполюсник | 286 |
| 7.1.3. Четырехполюсник без потерь | 287 |
| 7.1.4. Взаимный четырехполюсник | 288 |
| 7.1.5. Взаимный четырехполюсник без потерь | 289 |
| 7.1.6. Линия передачи как четырехполюсник | 289 |
| 7.1.7. Четырехполюсник как трансформатор нормированных сопротивлений | 290 |
| 7.1.8. Эквивалентность четырехполюсников | 293 |
| 7.2. Симметричные четырехполюсники | 294 |
| 7.2.1. Симметричный четырехполюсник при симметричных нормированных напряжениях в плечах | 296 |
| 7.2.2. Симметричный четырехполюсник при антисимметричных нормированных токах в плечах | 297 |
| 7.3. Неоднородности в волноводах | 298 |
| 7.3.1. Индуктивная диафрагма | 298 |
| 7.3.2. Нормированные параметры некоторых диафрагм | 302 |
| 7.3.3. Соединения двух волноводов | 304 |
| 7.4. Волноводные переходы | 310 |
| 7.4.1. Изменение сечения волновода | 310 |
| 7.4.2. Преобразователи типов волн | 310 |
| 7.5. Согласующие устройства | 312 |
| 7.6. Атенюаторы | 314 |
| 7.6.1. Атенюаторы предельного типа | 315 |
| 7.6.2. Атенюаторы поглощающего типа | 316 |
| 7.7. Взаимные фазовращатели | 321 |
| 7.7.1. Фазовращатели на основе изменения длины линии и изменения длины волны в линии | 321 |
| 7.7.2*. Фазовращатели поляризационного типа | 322 |

Глава 8. Объемные резонаторы СВЧ.....323

| | |
|---|-----|
| 8.1. Объемные резонаторы с одним элементом связи..... | 325 |
| 8.1.1. Основные характеристики резонатора..... | 326 |
| 8.1.2. Эквивалентные схемы объемного резонатора с одним элементом связи..... | 328 |
| 8.1.3. Резонаторные контуры на отрезке линии передачи с распределенными постоянными параметрами..... | 336 |
| 8.1.4. Полый резонатор в виде отрезка прямоугольного волновода..... | 338 |
| 8.1.5*. Экспериментальное определение параметров эквивалентных схем резонатора..... | 339 |
| 8.1.6*. Экспериментальное определение добротностей резонатора..... | 341 |
| 8.2*. Пропускной резонатор с двумя элементами связи..... | 346 |
| 8.2.1. Эквивалентные схемы и добротности..... | 346 |
| 8.2.2. Коэффициент передачи пропускного резонатора..... | 350 |
| 8.2.3. Полный резонатор с реактивностями, разделенными отрезком линии передачи..... | 354 |
| 8.3*. Каскадное включение двух пропускных резонаторов..... | 356 |
| 8.3.1. Эквивалентные схемы..... | 356 |
| 8.3.2. Полуволновое включение резонаторов..... | 356 |
| 8.3.3. Четвертьволновое включение резонаторов..... | 359 |

Глава 9. Фильтры СВЧ.....363

| | |
|--|-----|
| 9.1. Основные определения..... | 363 |
| 9.2. Нормированные фильтры-прототипы нижних частот..... | 366 |
| 9.2.1. Фильтр Баттерворта и Чебышевский фильтр..... | 367 |
| 9.2.2. Определение числа элементов в схеме фильтра-прототипа..... | 370 |
| 9.2.3. Фильтр-прототип с характеристикой Баттерворта..... | 371 |
| 9.2.4. Фильтр-прототип с характеристикой Чебышева..... | 372 |
| 9.3. Фильтры нижних частот..... | 374 |
| 9.3.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра..... | 374 |
| 9.3.2. Конструктивная реализация ФНЧ..... | 375 |
| 9.4. Фильтры верхних частот..... | 379 |
| 9.4.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра..... | 379 |

| | |
|---|-----|
| 9.4.2. Конструктивная реализация ФВЧ..... | 380 |
| 9.5. Полосно-пропускающие фильтры | 381 |
| 9.5.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра | 381 |
| 9.5.2. Конструктивные реализации ППФ..... | 385 |
| 9.6. Полосно-заграждающие фильтры..... | 393 |
| 9.6.1. Переход от схемы фильтра-прототипа к эквивалентной схеме проектируемого фильтра..... | 393 |
| 9.6.2. Конструктивные реализации ПЗФ | 395 |

Глава 10. Устройства с тремя плечами (тройники).....400

| | |
|--|-----|
| 10.1*. Общие свойства взаимных шестиполюсников без потерь | 400 |
| 10.1.1. Эквивалентные цепи | 400 |
| 10.1.2. Матрица рассеяния тройника..... | 403 |
| 10.1.3. Главная плоскость взаимного шестиполюсника..... | 407 |
| 10.1.4. Сопряженная плоскость взаимного шестиполюсника | 408 |
| 10.1.5. Основные свойства взаимных тройников..... | 410 |
| 10.2. Т- и Y-образные соединения..... | 411 |
| 10.2.1. Т-образные соединения..... | 411 |
| 10.2.2. Y-образные соединения..... | 417 |
| 10.3*. Невзаимные шестиполюсники без потерь. Циркуляторы..... | 420 |
| 10.3.1. Некоторые свойства невязимных шестиполюсников без потерь..... | 420 |
| 10.3.2. Циркулятор со смещением поля..... | 422 |
| 10.3.3. Циркулятор с использованием эффекта Фарадея..... | 424 |
| 10.4*. Применения тройниковых соединений..... | 425 |
| 10.4.1. Волномер с поглощающим объемным резонатором.... | 425 |
| 10.4.2. Избирательный разветвитель (уплотнитель каналов)..... | 426 |
| 10.4.3. Применение циркуляторов..... | 427 |

Глава 11. Устройства с четырьмя плечами.

Направленные ответвители..... 430

| | |
|---|-----|
| 11.1. Основные определения. Идеальный направленный ответвитель | 430 |
| 11.1.1. Матрица рассеяния идеального направленного ответвителя типа I..... | 431 |
| 11.1.2. Матрица рассеяния гибридного ответвителя..... | 433 |
| 11.1.3*. Идеальный направленный ответвитель как согласованный по всем входам восьмиполюсник без потерь..... | 434 |
| 11.1.4. Основные характеристики реальных направленных ответвителей..... | 435 |
| 11.1.5. Типичный пример применения направленного ответвителя | 436 |
| 11.2. Типы направленных ответвителей..... | 437 |
| 11.2.1. Направленные ответвители с одним элементом связи | 437 |
| 11.2.2. Направленные ответвители с двумя элементами связи..... | 439 |
| 11.2.3*. Распределенная дискретная связь | 441 |
| 11.2.4*. Направленные ответвители с распределенной дискретной связью..... | 449 |
| 11.3. Направленные ответвители с непрерывной связью..... | 451 |
| 11.3.1. Направленные ответвители на связанных полосковых линиях передачи | 452 |
| 11.3.2*. Полосковые направленные ответвители с сильной связью..... | 457 |
| 11.4. Кольцевые направленные ответвители..... | 461 |
| 11.4.1. Шлейфный ответвитель и гибридное кольцо | 461 |
| 11.4.2. Метод декомпозиции кольцевых ответвителей..... | 463 |
| 11.5*. Некоторые применения направленных ответвителей..... | 465 |
| 11.5.1. Рефлектометры..... | 465 |
| 11.5.2. Применение гибридных ответвителей..... | 466 |
| 11.5.3. Ответвитель с переменной связью..... | 469 |
| 11.5.4. Резонатор бегущей волны | 470 |
| 11.6*. Делители и сумматоры мощности на основе направленных ответвителей | 472 |
| 11.6.1. Определения. Типы делителей и сумматоров мощности..... | 472 |
| 11.6.2. Кольцевые делители мощности..... | 475 |

Глава 12*. Восьмиполюсные мостовые соединения.....479

| | |
|--|-----|
| 12.1. Гибридный и магический двойные Т-образные мосты..... | 479 |
| 12.1.1. Гибридный двойной Т-образный мост..... | 479 |
| 12.1.2. Магический Т-образный мост..... | 482 |
| 12.1.3. Свойства магического двойного Т-образного моста с согласованными нагрузками..... | 484 |
| 12.1.4. Свойства магического двойного Т-образного моста с произвольными нагрузками..... | 486 |
| 12.1.5. Матрицы нормированных сопротивлений и проводимостей..... | 488 |
| 12.2. Гибридные мосты кольцевой и прямоугольной конфигураций..... | 490 |
| 12.2.1. Кольцевой гибридный мост..... | 490 |
| 12.2.2. Гибридный мост прямоугольной конфигурации..... | 494 |
| 12.3. Волноводно-щелевые мосты в Н- и Е-плоскостях..... | 495 |
| 12.3.1. Волноводно-щелевой мост в Н-плоскости..... | 495 |
| 12.3.2. Волноводно-щелевой мост в Е-плоскости..... | 499 |
| 12.4. Применение мостовых соединений..... | 499 |
| 12.4.1. Измерение коэффициента отражения с помощью моста сопротивлений..... | 499 |
| 12.4.2. Фазовращатель и согласующее устройство..... | 502 |
| 12.4.3. Антенный переключатель..... | 505 |
| 12.4.4. Четырехплечий циркулятор..... | 506 |
| 12.4.5. Фазовый детектор..... | 507 |
| 12.4.6. Балансный смеситель..... | 509 |
| 12.4.7. Частотный дискриминатор..... | 510 |
| 12.4.8. Балансный модулятор..... | 513 |
| 12.4.9. Переменный аттенюатор..... | 514 |

Глава 13. Устройства СВЧ на полупроводниковых диодах.....516

| | |
|---|-----|
| 13.1. Устройства с диодами переменной емкости..... | 517 |
| 13.1.1. Полупроводниковые диоды..... | 519 |
| 13.1.2. Плавный фазовращатель на варакторе..... | 521 |
| 13.2. Регулирующие устройства с полупроводниковыми диодами..... | 521 |

| | |
|---|-----|
| 13.2.1. Коммутационные диоды СВЧ..... | 521 |
| 13.2.2. Параметры р-і-п-диодов..... | 522 |
| 13.2.3. Трансформация сопротивлений коммутационных диодов | 527 |
| 13.2.4. Управление амплитудой сигнала | 529 |
| 13.2.5. Выключатели СВЧ на коммутационных диодах..... | 529 |
| 13.2.6. Переключатели (коммутаторы) СВЧ | 531 |
| 13.2.7. Дискретные фазовращатели..... | 537 |
| 13.2.8. Аттenuаторы на р-і-п-диодах..... | 546 |
| 13.2.9. Ограничители мощности СВЧ | 549 |

Глава 14. Ферритовые устройства СВЧ.....551

| | |
|---|-----|
| 14.1. Основные свойства ферритов..... | 551 |
| 14.1.1*. Основные электромагнитные параметры нормализованных марок ферритов для диапазонов СВЧ и КВЧ..... | 553 |
| 14.1.2. Статические магнитные параметры ферритов..... | 554 |
| 14.1.3. Диэлектрические свойства ферритов | 556 |
| 14.1.4. Динамические магнитные параметры и характеристики ферритов | 556 |
| 14.2. Классификация ферритовых устройств..... | 561 |
| 14.3. Невзаимные ферритовые устройства | 564 |
| 14.3.1. Устройства на основе эффекта Фарадея..... | 564 |
| 14.3.2. Устройства с поперечно-подмагниченными ферритами..... | 566 |
| 14.3.3*. Фазовые циркуляторы..... | 570 |
| 14.4. Управляемые фазовращатели и перестраиваемые фильтры | 573 |
| 14.4.1. Ферритовые фазовращатели | 573 |
| 14.4.2*. Перестраиваемые ферритовые фильтры | 575 |
| 14.4.3*. Циркулятор с сосредоточенными параметрами..... | 578 |

Список литературы.....580