621.3.09
Ш-26

Г. А. Шаров

Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств

Горячая линия–Телеком

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ 3

1. **ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И УРАВНЕНИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ** 6

1.1. Характеристики электромагнитного поля и среды ... 6

1.2. Интегральные уравнения электромагнитного поля ... 11

1.2.1. Закон взаимодействия электрических зарядов (закон Кулона) 11

1.2.2. Закон о возбуждении магнитного поля (закон Ампера) 12

1.2.3. Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея) 12

1.2.4. Обобщение экспериментальных законов Максвеллом 13

1.3. Дифференциальные уравнения электромагнитного поля 15

1.4. Уравнение непрерывности (закон сохранения заряда) 17

1.5. Уравнения Максвелла в символической форме записи. Уравнение Лапласа 18

1.6. Граничные условия 21

1.6.1. Граничные условия для тангенциальных составляющих поля 21

1.6.2. Граничные условия для нормальных составляющих поля 23

1.6.3. Поля на поверхности идеального проводника 24

1.6.4. Поля на поверхности диэлектрика 25

1.6.5. О полях на бесконечности 25

1.7. Метод комплексных амплитуд 26

1.8. Теорема Умова–Пойнтинга 27

1.9. Волновые уравнения и плоские волны 29

1.9.1. Уравнение Гельмгольца 29

1.9.2. Плоские электромагнитные волны 33

1.9.3. Поляризация плоских волн 35

1.9.4. Плоские волны в среде с потерями 37

1.9.5. Плоские волны в хорошем проводнике 39

1.9.6. О волновом сопротивлении плоских волн 41

1.10. Теорема взаимности Лоренца 41

1.10.1. Лемма Лоренца 42

1.10.2. Теорема взаимности 45

1.10.3. Обобщение леммы Лоренца на случай двух полей разной частоты 46

2. ТЕОРИЯ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ (ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ) ... 48
2.1. Модель передающей линии на основе схемы с сосредоточенными параметрами ... 48
2.1.1. Вывод телеграфных уравнений ... 48
2.1.2. Распространение волн в линии передачи ... 50
2.1.3. Линия без потерь ... 52
2.2. Полевой анализ линии передачи ... 53
2.2.1. Параметры линии передачи ... 53
2.2.2. Вывод телеграфных уравнений на основе анализа поля коаксиальной линии ... 55
2.2.3. Постоянная распространения, импеданс и поток мощности в коаксиальной линии без потерь ... 57
2.3. Линия передачи без потерь, заканчивающаяся нагрузкой ... 58
2.3.1. Общий случай ... 58
2.3.2. Линия без потерь, короткозамкнутая на конце ... 62
2.3.3. Линия без потерь, разомкнутая на конце ... 63
2.3.4. Линия без потерь, нагруженная на чисто реактивную нагрузку (на конденсатор ёмкостью C или на индуктивность L) ... 64
2.3.5. Линия без потерь, нагруженная на активное сопротивление ... 66
2.3.6. Линия без потерь и с потерями, нагруженная на комплексное сопротивление ... 67
2.3.7. Линия без потерь, нагруженная на другую линию ... 69
2.4. Децибелы и неперы ... 70
2.5. Круговая диаграмма линии передачи (диаграмма Смита) ... 72
2.5.1. Вывод основных соотношений диаграммы Смита ... 73
2.5.2. Вид диаграммы Смита и работа с ней ... 76
2.6. Согласование линий ... 81
2.7. Рассогласование генератора и нагрузки ... 82
2.8. Линия передачи с потерями ... 86
2.8.1. Линия с малыми потерями ... 86
2.8.2. Линия без искажений ... 87
2.8.3. Нагруженная линия с потерями ... 88
2.8.4. Вычисление затухания по методу возмущения ... 89
3. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СВЧ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ... 92
3.1. Назначение и основные типы СВЧ линий ... 92
3.2. Общие решения для TEM, TE и TM-волн ... 94
3.2.1. TEM-волны ... 97
3.2.2. TE-волны ... 100

3.2.3. TM-волны ... 101
3.2.4. Некоторые общие соотношения, справедливые для цилиндрических волноводов ... 102
3.2.5. Затухание волн в цилиндрических волноводах ... 104
3.3. Прямоугольные волноводы ... 109
3.3.1. Случай поперечно-магнитных волн (TM-тип волн) . 110
3.3.2. Случай поперечно-электрических волн (TE-тип волн) 114
3.3.3. Поле волны H_{10} в прямоугольном волноводе ... 116
3.4. Круглые волноводы ... 123
3.4.1. Случай поперечно-магнитных волн (TM-тип волн) . 123
3.4.2. Случай поперечно-электрических волн (TE-тип волн) 126
3.5. Коаксиальная линия ... 129
3.5.1. Поля коаксиального волновода ... 129
3.5.2. Коаксиальные кабели ... 134
3.6. Гребенчатые (П- и Н-) волноводы ... 137
3.6.1. Критические длины волн одногребенчатых волноводов ... 138
3.6.2. Волновое сопротивление одногребенчатого волновода 141
3.7. Волноводная линия типа фин-лайн ... 142
3.8. Планарные линии передачи ... 144
3.8.1. Основные типы планарных линий ... 144
3.8.2. Материалы планарных структур ... 147
3.8.3. Микрополосковые линии ... 149
3.8.4. Копланарные линии передачи ... 155
3.8.5. Щелевые линии ... 160
3.9. Диэлектрические волноводы ... 163
3.9.1. Особенности распространения электромагнитных волн по диэлектрическим волноводам ... 163
3.9.2. Распространение волн вдоль диэлектрического стержня ... 165
3.10. Неоднородности в СВЧ линиях передачи ... 169
3.10.1. Неоднородности и реактивные элементы в волноводах ... 170
3.10.2. Неоднородности в микрополосковых линиях передачи ... 177
3.11. Групповая скорость электромагнитных волн в волноводах ... 180
4. АНАЛИЗ СВЧ ЦЕПЕЙ ... 183
4.1. Представление и описание устройств и цепей СВЧ в обобщённом виде ... 186
4.1.1. Эквивалентные многополюсники ... 186
4.1.2. Напряжения и токи на входе многополюсника и их связь с падающими и отражёнными волнами ... 190

4.2. Матрицы классической теории цепей (матрицы сопротивлений, проводимостей и передачи $2n$-полюсников) 192
4.3. Матрица рассеяния ... 194
4.3.1. Нормированные волны и определение матрицы рассеяния ... 194
4.3.2. Унитарность матрицы рассеяния ... 198
4.4. Волновые матрицы передачи $[T]$ и каскадные $[R]$ ... 200
4.5. Связь между матрицами $2n$-полюсника ... 201
4.5.1. Связь импедансных матриц и матрицы $[A]$ с матрицей рассеяния $[S]$ ... 202
4.5.2. Связь волновых матриц $[T]$ и $[R]$ с матрицей рассеяния $[S]$ ... 204
4.6. Некоторые свойства многополюсников ... 206
4.6.1. Взаимность многополюсников ... 206
4.6.2. Недиссипативность многополюсников ... 208
4.6.3. Симметричность многополюсников ... 209
4.7. Переход от многополюсника к призводному четырёхполюснику ... 211
4.8. Четырёхполюсники СВЧ ... 211
4.8.1. Матричное описание четырёхполюсников СВЧ ... 211
4.8.2. Физический смысл элементов волновых матриц четырёхполюсника ... 213
4.8.3. Условия обратимости, симметрии, антиметрии и реактивности четырёхполюсников в терминах волновых матриц 215
4.8.4. Элементарные четырёхполюсники и их матрицы ... 218
4.9. Соединения четырёхполюсников ... 221
4.10. Использование симметрии при анализе схем ... 224
4.11. Применение метода ориентированных графов к анализу СВЧ цепей ... 226
4.11.1. Основные определения ... 226
4.11.2. Составление графов для СВЧ цепей ... 228
4.11.3. Нахождение решений для графов по правилу Мэзона 232
4.11.4. Инверсия пути в ориентированных графах ... 235
4.11.5. Методы упрощения ориентированных графов ... 238
4.11.6. Ориентированные графы матриц ... 242
5. СВЧ РЕЗОНАТОРЫ ... 244
5.1. Низкочастотные резонансные схемы ... 244
5.2. Резонаторы на линиях передачи ... 250
5.3. Проходные резонаторы ... 254
5.3.1. Резонаторы на двух разнесённых нерегулярностях в линии передачи ... 254
5.3.2. Проходной резонатор на штыревых диафрагмах ... 256
5.4. Объёмные волноводные резонаторы ... 259

5.4.1. Собственные колебания объёмного резонатора 259
5.4.2. Цилиндрический резонатор 261
5.4.3. Резонатор с потерями. Добротность резонатора 267
5.5. Микрополосковые резонаторы 271
5.6. Диэлектрические резонаторы 276
5.7. Открытые резонаторы 282
5.7.1. Плоский резонатор 284
5.7.2. Резонаторы со сферическими зеркалами 289
5.8. Резонаторы, используемые в электронике 294
6. ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛНОВОДОВ И РЕЗОНАТОРОВ 296
6.1. Ортогональность собственных функций волновода ... 297
6.2. Возбуждение волноводов заданными токами 301
6.3. Возбуждение волновода щелью (заданным распределением поля) 307
6.4. Примеры возбуждения волноводов заданными токами 309
6.4.1. Токовая пластина, возбуждающая только одну волноводную моду 309
6.4.2. Возбуждение прямоугольного волновода электрическим зондом 312
6.4.3. Возбуждение прямоугольного волновода петлёй 313
6.5. Возбуждение волноводов через апертурную связь 314
6.5.1. Связь через апертуру в поперечной стенке волновода 317
6.5.2. Связь через апертуру в широкой стенке волновода .. 320
6.6. Возбуждение микрополосковых линий передачи 321
6.7. Возбуждение резонаторов 321
6.7.1. Критическая связь 322
6.7.2. Возбуждение объёмных резонаторов заданными источниками 323
6.7.3. Объёмный резонатор с апертурным возбуждением .. 329
6.7.4. Микрополосковый резонатор с щелевой связью 330
7. ДЕЛИТЕЛИ СВЧ МОЩНОСТИ И НАПРАВЛЕННЫЕ ОТВЕТВИТЕЛИ 333
7.1. Основные свойства делителей и ответвителей 334
7.1.1. Трёхпортовые схемы (Т-соединения) 334
7.1.2. Четырёхпортовые схемы (направленные ответвители) 337
7.1.3. О некоторых соотношениях для направленных ответвителей 339
7.2. Обозначения и параметры направленных ответвителей. Гибридные ответвители 342
7.3. Делители мощности на основе Т-сочленений 344
7.3.1. Делитель без потерь 344
7.3.2. Резистивный делитель 345

7.4. Делитель мощности Вилкинсона 346
7.5. Волноводные E- и H-тройники 350
7.6. Волноводные направленные ответвители 354
7.6.1. Ответвитель Бете 356
7.6.2. Многоэлементные направленные ответвители 359
7.7. Гибридные устройства 365
7.7.1. Квадратурные (90°) гибридные устройства 365
7.7.2. Гибридные устройства с фазовым сдвигом выходных портов 180° 368
7.7.3. Анализ гибридного кольца 369
7.7.4. Двойной волноводный EH-тройник (магический T) . 372
8. СВЧ ФИЛЬТРЫ 379
8.1. Назначение и основные типы фильтров 379
8.2. Расчёт СВЧ фильтров по характеристическим и рабочим параметрам 382
8.3. Фильтры нижних частот со ступенчатым импедансом (ступенчатые фильтры) 388
8.4. Периодические структуры волноводных ФНЧ 390
8.5. К теории полосовых фильтров 396
8.6. О реализации схем полосовых фильтров на СВЧ 404
8.6.1. Частотное преобразование Ричардса. Тождества Куроды 404
8.6.2. Применение отрезков передающих линий в качестве резонаторов 407
8.7. Полосовые фильтры из резонаторов с ёмкостными связями 409
8.8. Применение диафрагм при реализации схем волноводных полосовых фильтров 411
9. ФЕРРИТОВЫЕ СВЧ УСТРОЙСТВА 413
9.1. Свойства ферритов 413
9.2. Тензоры магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости 416
9.3. Фарадеевское вращение (распространение волны в направлении подмагничивающего поля) 420
9.4. Полосовые ферритовые фильтры с магнитной перестройкой 422
9.4.1. Ферритовые резонаторы 422
9.4.2. Принцип действия и типы фильтров на ферритовых резонаторах 425
9.5. Волноводные ферритовые фазовращатели 429
9.6. Волноводные ферритовые вентили 433
9.6.1. Общие сведения 433

9.6.2. Принцип действия и конструкции волноводных ферритовых вентилей ... 434
9.7. Волноводные циркуляторы ... 440
9.7.1. Общие сведения ... 440
9.7.2. Четырёхпортовые фазовые циркуляторы ... 441
9.7.3. Четырёхпортовый поляризационный циркулятор ... 444
9.7.4. Трёхпортовые (Y-) циркуляторы ... 448
ПРИЛОЖЕНИЯ ... 453
1. Основные формулы векторного исчисления ... 453
2. Аппроксимирующие функции и полиномы ... 457
ЛИТЕРАТУРА ... 463