

С. Ф. Горгадзе

СВЧ-

УСИЛИТЕЛИ
МОЩНОСТИ

ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ
И РАДИОДОСТУПА



Оглавление

Предисловие	3
1 Активные элементы	7
1.1. Мощные СВЧ-транзисторы: классификация и базовые параметры	7
1.2. Структура и параметры мощного высокочастотного MOSFET	10
1.3. LDMOS-транзистор	18
1.4. Структура и параметры MESFET	21
1.5. HEMT (MODFET) на основе GaAs	27
1.6. HEMT на основе GaN	30
1.7. Сверхвысокочастотный BJT	32
1.8. Гетеробиполярный транзистор	39
1.9. Заключение	41
Литература	43
2. Модели на основе четырехполюсника	45
2.1. Модель малосигнальных S-параметров	46
2.2. AM/AM и AM/PM характеристики	52
2.3. Модель X-параметров	55
2.4. Диаграмма Смита и модели усилителей мощности	61
Литература	69
3. Эквивалентные схемы активных элементов	71
3.1. Малосигнальные эквивалентные схемы полевых и бипо- лярных транзисторов	71
3.2. Эквивалентная схема MOSFET для ключевых режимов	73
3.3. Нелинейная модель LDMOS-транзистора	77
3.4. Эквивалентная схема MESFET и HEMT в режиме боль- ших сигналов	80
3.5. Нелинейные эквивалентные схемы сверхвысокочастот- ного BJT	83
3.6. Эквивалентная схема HBT в режиме больших сигналов	99
3.7. Тепловые модели	100
3.8. Заключение	101

Литература.....	102
4. Математические модели	104
4.1. Временной анализ.....	106
4.2. Метод гармонического баланса.....	115
4.2.1. Составление исходной системы уравнений.....	115
4.2.2. Метод Ньютона–Рафсона	117
4.2.3. Методы решения СЛАУ проекционного типа.....	120
4.2.4. Подпространства Крылова и ортогонализация Ар- нольди.....	123
4.2.5. GMRES	125
4.2.6. Вращения Гивенса.....	126
4.2.7. Перезапускаемая (рестартовая) версия GMRES	128
4.2.8. Симуляторы и пакеты схемотехнического проектирова- ния СВЧ-схем.....	129
4.3. Анализ на основе функционального ряда Вольтерры... ..	131
4.4. Заключение	137
Литература.....	138
5. Цепи согласования	141
5.1. Согласование на основе модели четырехполюсника с по- мощью натурального эксперимента.....	143
5.2. Согласование на основе математических моделей.....	147
5.3. Согласование на основе эквивалентной схемы	148
5.4. Цепи согласования на сосредоточенных элементах	152
5.4.1. Г-образный четырехполюсник и цепи согласования на его основе.....	152
5.4.2. П-образные четырехполюсники.....	157
5.4.3. Т-образные цепи согласования.....	160
5.5. Цепи согласования на распределенных элементах	162
5.5.1. Микрополосковые линии передачи и их соединения... ..	163
5.5.2. Представление линии передачи на диаграмме Смита..	169
5.5.3. Свойства и эквивалентные схемы линий передачи	172
5.5.4. Примеры разработки ЦС на микрополосковых линиях	178
5.6. Заключение	183
Литература	185
6. Цепи питания	187
6.1. Общий подход к разработке цепей питания	187
6.1.1. Выходные цепи последовательного питания	188
6.1.2. Выходные цепи параллельного питания	189
6.1.3. Входные цепи параллельного питания.....	190
6.2. Влияние полосы пропускания цепей питания	192
6.3. Цепи питания FET.....	195
6.4. Цепи входного питания с температурной компенсацией	199

6.5. Заключение	200
Литература	202
7. Безынерционный резонансный усилитель	203
7.1. Идеализированный усилитель с резонансной нагрузкой	203
7.2. Фазовые соотношения между токами и напряжениями. Отсечка тока	207
7.3. Линия нагрузки и динамическая характеристика	209
7.4. Напряженность режима	210
7.5. Зависимость режима АЭ от амплитуды сигнала возбуждения, напряжений смещения и питания	215
7.6. Влияние сопротивления нагрузки на режим работы АЭ. Нагрузочные характеристики	217
7.7. Влияние угла отсечки на характеристики усилителя. Коэффициенты Берга	218
7.8. Расчет усилителя сигнала с постоянной амплитудной огибающей в граничном режиме на заданную мощность в нагрузке	223
7.9. Классы усиления А, АВ, В и С	224
7.10. Нелинейные искажения сигнала в безынерционном резонансном усилителе	229
7.11. Заключение	237
Литература	237
8. Резонансные усилители с сигналами негармонических форм на выходе АЭ	239
8.1. Эффективность усилителей мощности	240
8.2. Усилители класса А с негармоническими формами напряжения и тока	243
8.2.1. Режим оптимальной нагрузки	243
8.2.2. Режим максимальной мощности и КПД	247
8.3. Усилители класса В с негармоническими формами напряжения и тока	249
8.3.1. Класс F	249
8.3.2. Режим максимальной мощности	252
8.4. Принципы построения схем усилителей в режимах перегрузки	254
8.5. Заключение	259
Литература	259
9. Ключевые режимы	260
9.1. Квазиключевой режим	260
9.2. Усилители мощности класса D	262
9.2.1. Однотактный ключевой УМ класса D	262
9.2.2. Двухтактные усилители мощности класса D	266

9.3. Усилители класса Е.....	273
9.4. Основные недостатки усилителей классов D и Е.....	279
9.5. Сравнение усилителей классов Е и F.....	279
9.5. Заключение.....	281
Литература.....	282
10. Специальные усилители сигналов с амплитудной модуляцией.....	283
10.1. Усилитель А. Кана.....	284
10.2. Автоматическое регулирование режима.....	294
10.3. Усилитель Догерти.....	298
10.4. Усилитель Ширекса.....	303
10.5. Линейные усилители с дельта-сигма модуляцией или ШИМ на нелинейных элементах.....	307
10.6. Заключение.....	312
Литература.....	315
11. Нелинейные искажения и их компенсация.....	317
11.1. Поведенческие модели УМ.....	318
11.2. Безынерционные нелинейные модели.....	321
11.2.1. Классификация моделей.....	321
11.2.2. Модель абсолютно безынерционной системы на основе ряда Тейлора.....	323
11.2.3. Полиномиальные безынерционные модели.....	328
11.2.4. Параметрические эмпирические аналитические модели.....	334
11.2.5. Табличная модель.....	337
11.3. Компенсация безынерционных нелинейных искажений.....	339
11.3.1. Компенсация с цифровыми предварительными искажениями.....	339
11.3.2. Компенсация с петлей обратной связи на основе LUT.....	342
11.4. Модели с нелинейной памятью.....	345
11.4.1. АМ/АМ и АМ/РМ характеристики УМ.....	345
11.4.2. Модели регрессии на основе ряда Вольтерры.....	348
11.4.3. Исследование нелинейных искажений на основе модели регрессии.....	350
11.5. Идентификация параметров полиномиальных моделей.....	353
11.5.1. Обзор методов.....	353
11.5.2. Эффективность модели.....	359
11.6. Критерии линейности.....	361
11.7. Компенсация искажений с нелинейными эффектами памяти.....	365
11.7.1. Предварительные цифровые искажения для полиномиальных моделей нелинейных эффектов памяти.....	365

11.7.2. Имитационное моделирование компенсации искажений с нелинейными эффектами памяти	368
11.8. Заключение	373
Литература	374
12. Суммирование мощностей	377
12.1. Основные определения и характеристики мостовых схем	378
12.2. Мостовые схемы на сосредоточенных элементах	380
12.3. Мостовые схемы на микрополосковых линиях	383
12.3.1. Шлейфовые ответвители	383
12.3.2. Мосты Ланге	383
12.3.3. Ответвители Вилкинсона	386
12.4. Суммирование мощностей многих АЭ	387
12.4.1. Классификация многополюсных схем сумматоров-делителей	387
12.4.2. Сумматоры параллельного типа на мостах Ланге	389
12.4.3. Сумматор параллельного типа на отрезках линий ...	391
12.4.4. Сумматор параллельного типа на основе шестиполусников	392
12.4.5. Двухсекционный сумматор параллельного типа на укороченных отрезках линий	393
12.4.6. Сумматор параллельного типа на отрезках линий с вынесенными балластными нагрузками	394
12.4.7. Сумматор последовательного типа на шестиполусниках	394
12.4.8. Сумматоры последовательного типа на восьмиполусниках	395
12.5. Заключение	396
Литература	396
Приложения	398
1. Модели шума активных элементов	398
Литература	403
2. Шумы в усилителях мощности	403
Литература	409
3. Список компаний, специализирующихся на производстве мощных СВЧ-транзисторов	409
4. Результаты «горячих» измерений S-параметров типичного нитрид-галлиевого транзистора с высокой подвижностью электронов	410
5. Представление S-параметров транзистора на диаграмме Смита	411
6. Список параметров BJT в Spice-подобных системах	414
7. Пояснения к выводу выражения для ряда Вольтерры..	417

8. Безынерционные модели нелинейного прибора на основе полиномов Гегенбауэра и Зернике.....	421
9. Идентификация параметров безынерционной полиномиальной модели методом LMS.....	422
10. Теоретические основы анализа многополюсных сумматоров-делителей.....	426