

У. Титце  
К. Шенк

# Полупроводниковая схемотехника

12-е издание

Том II

**УДК 621.382**

**ББК 32.852**

**T45**

**Титце У., Шенк К.**

**T45** Полупроводниковая схемотехника. 12-е изд. Том II: Пер. с нем. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.: ил.

**ISBN 5-94074-148-7**

Книга Ульриха Титце и Кристофа Шенка «Полупроводниковая схемотехника» представляет собой фундаментальный труд, объединяющий принципы устройства полупроводниковых элементов (диоды, биполярные и полевые транзисторы, интегральные микросхемы) и основы создания из этих элементов различных функциональных узлов аналоговой техники (усилители, модуляторы, фильтры, радиоприемники) и цифровой (спусковые схемы, счетчики, регистры, шифраторы и дешифраторы, устройства памяти и т.д.).

Книга разбита на два тома: первый посвящен основам схемотехники, второй – применениям функциональных узлов при создании более сложных устройств.

При изложении материала широко используются эквивалентные схемы как полупроводниковых элементов, так и функциональных узлов, соответствующие работе в области постоянного тока и низких/высоких частот. Особое внимание уделено также переходным процессам цифровых схем. Описание каждого элемента или схемы сопровождается необходимым количеством достаточно элементарных формул, служащих для их инженерного расчета.

Энциклопедическая полнота, обилие самых разных схем и доступное математическое обоснование делают книгу полезной широкому кругу читателей: радиолобителям, техникам ремонтных предприятий, инженерам радиотехники и электроники и научным работникам.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельца авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно остается, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможный ущерб любого вида, связанный с применением содержащихся здесь сведений.

Все торговые знаки, упомянутые в настоящем издании, зарегистрированы. Случайное неправильное использование или пропуск торгового знака или названия его законного владельца не должно рассматриваться как нарушение прав собственности.

ISBN 3-540-42849-6 (нем.)

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002

Springer-Verlag is a company in the BertelsmannSpringer publishing group. All Rights Reserved.

ISBN 5-94074-148-7 (рус.)

© Перевод на русский язык, оформление ДМК Пресс, 2007

# Содержание

<b>11. Линейные и нелинейные аналоговые вычислительные схемы</b>	<b>21</b>
11.1 Схема суммирования .....	21
11.2 Схемы вычитания .....	22
11.2.1 Использование сложения .....	22
11.2. Схемы вычитания .....	23
11.2.2 Схема вычитания на операционном усилителе .....	23
11.3 Схема с изменяемым модулем и знаком коэффициента .....	26
11.4 Схемы интегрирования .....	27
11.4.1 Инвертирующий интегратор .....	27
11.4.2 Начальные условия .....	30
11.4.3 Суммирующий интегратор .....	32
11.4.4 Неинвертирующий интегратор .....	32
11.5 Схемы дифференцирования .....	33
11.5.1 Принципиальная схема .....	33
11.5.2 Практическая реализация .....	34
11.5.3 Дифференцирующее устройство с высоким входным сопротивлением	34
11.6 Решение дифференциальных уравнений .....	35
11.7 Функциональные преобразователи .....	37
11.7.1 Логарифмирующее устройство .....	38
11.7.2 Реализация экспоненциальной функции .....	41
11.7.3 Вычисление степенных функций с помощью логарифма .....	43
11.7.4 Формирование функций $\sin x$ и $\cos x$ .....	44
Применение степенных рядов .....	47
Дифференциальный усилитель .....	48
Функция $\cos x$ .....	49
Одновременное формирование функций $\sin x$ и $\cos x$ для аргумента в диапазоне $-\pi \leq x \leq +\pi$ .....	50
11.7.5 Перестраиваемые функциональные схемы .....	51
11.8 Аналоговые схемы умножения .....	53
11.8.1 Умножение с помощью логарифмических функциональных генераторов .....	54
11.8.2 Умножитель, использующий изменение крутизны транзистора .....	55
Схема деления с улучшенными характеристиками .....	60
11.8.3 Схема умножения с электрически изолированными элементами .....	61
11.8.4 Коррекция схем умножения .....	63
11.8.5 Применение одно- и двухквadrантного умножителей для четырехквadrантного умножения .....	64
11.8.6 Использование схемы умножения для деления и извлечения квadrатных корней .....	65
11.9 Преобразование координат .....	66
11.9.1 Преобразование полярных координат в декартовы .....	66
11.9.2 Преобразование декартовых координат в полярные .....	67
Литература .....	68

## 12. Управляемые источники и схемы преобразования полного

<b>сопротивления</b>	<b>70</b>
12.1 Источники напряжения, управляемые напряжением .....	70
12.2 Источники напряжения, управляемые током .....	72
12.3 Источники тока, управляемые напряжением .....	73
12.3.1 Источники тока с незаземленной нагрузкой .....	74
12.3.2 Источники тока с заземленной нагрузкой .....	76
12.3.3 Эталонные источники тока на транзисторах .....	77
Транзисторные источники тока с биполярным выходным током .....	81
12.3.4 Плавающие источники тока .....	84
12.4 Источники тока, управляемые током .....	85
12.5 Преобразователь отрицательного сопротивления (NIS) .....	86
12.6 Гиратор .....	89
12.7 Циркуляторы .....	93
Литература .....	95
<b>13. Активные фильтры</b>	<b>97</b>
13.1 Теоретические основы фильтров нижних частот .....	97
13.1.1 Фильтр нижних частот Баттерворта .....	101
13.1.2 Фильтры нижних частот Чебышева .....	104
13.1.3 Фильтры Бесселя .....	108
13.1.4 Обобщенная теория фильтров .....	111
13.2 Преобразование фильтров нижних частот в фильтры верхних частот .....	120
13.3 Реализация фильтров верхних и нижних частот первого порядка .....	121
13.4 Реализация фильтров верхних и нижних частот второго порядка .....	123
13.4.1 LRC-фильтр .....	123
13.4.2 Фильтр с многопетлевой отрицательной обратной связью .....	124
13.4.3 Фильтр с одной петлей положительной обратной связи .....	125
13.5 Реализация фильтров верхних и нижних частот более высокого порядка .....	128
13.6 Преобразование фильтра нижних частот в полосовой фильтр .....	130
13.6.1 Полосовой фильтр второго порядка .....	131
13.6.2 Полосовой фильтр четвертого порядка .....	133
13.7 Реализация полосовых фильтров второго порядка .....	135
13.7.1 LRC-фильтр .....	136
13.7.2 Полосовой фильтр с многопетлевой отрицательной обратной связью .....	136
13.7.3 Полосовой фильтр с одной петлей положительной обратной связи .....	138
13.8 Преобразование фильтра нижних частот в режекторный фильтр .....	139
13.9 Реализация режекторных фильтров второго порядка .....	141
13.9.1 Режекторный LRC-фильтр .....	141
13.9.2 Активный режекторный фильтр с двойным Т-образным мостом .....	141
13.9.3 Активный режекторный фильтр с мостом Вина-Робинсона .....	142
13.10 Фазовые фильтры .....	144
13.10.1 Принцип действия .....	144
13.10.2 Реализация фазового фильтра первого порядка .....	146
13.10.3 Реализация фазового фильтра второго порядка .....	147
13.11 Перестраиваемый универсальный фильтр .....	149
13.11.1 Фильтр с перестраиваемыми коэффициентами .....	149
13.11.2 Фильтр с перестраиваемыми параметрами .....	150
13.11.3 Электронное управление параметрами фильтров .....	153
13.12 Фильтры с переключаемыми конденсаторами .....	155
13.12.1 Основные принципы .....	155
13.12.2 SC-интегратор .....	156

13.12.3	SC-фильтр первого порядка .....	157
13.12.4	Проектирование SC-фильтров второго порядка .....	158
13.12.5	Интегральная реализация SC-фильтров .....	160
13.12.6	Общая точка зрения на применение SC-фильтров .....	160
13.12.7	Обзор выпускаемых SC-фильтров .....	161
	Литература .....	163
<b>14.</b>	<b>Генераторы сигналов .....</b>	<b>164</b>
14.1	LC-генераторы .....	164
14.1.1	Основные условия генерации .....	164
14.1.2	Схемы генераторов Мейснера .....	166
14.1.3	Генератор Хартля (схема индуктивной трехточки) .....	168
14.1.5	LC-генератор с эмиттерной обратной связью .....	169
14.1.4	Генератор Колпитца (схема емкостной трехточки) .....	169
14.1.6	Двухтактные генераторы .....	170
14.2	Кварцевые генераторы .....	171
14.2.1	Электрические свойства кварцевого резонатора .....	172
14.2.2	Генераторы первой гармоники .....	173
14.2.3	Генераторы гармоник .....	175
14.3	Генераторы с мостом Вина .....	177
14.4	Генераторы с аналоговым вычислителем .....	181
14.5	Функциональные генераторы .....	184
14.5.1	Принцип действия генератора .....	185
14.5.2	Практическая реализация .....	185
14.5.3	Функциональные генераторы с управляемой частотой .....	187
	Переменный коэффициент заполнения .....	188
14.5.4	Функциональные генераторы, формирующие одновременно синусоидальные и косинусоидальные колебания .....	190
	Литература .....	191
<b>15.</b>	<b>Усилители мощности .....</b>	<b>193</b>
15.1	Эмиттерный повторитель как усилитель мощности .....	193
15.2	Комплементарный эмиттерный повторитель .....	195
15.2.1	Комплементарные эмиттерные повторители в режиме класса В .....	195
15.2.2	Комплементарные эмиттерные повторители класса АВ .....	198
15.2.3	Формирование напряжения смещения .....	199
15.3	Комплементарные схемы Дарлингтона .....	201
15.4	Комплементарные истоковые повторители .....	203
15.5	Электронное ограничение тока .....	204
	Ограничение тока, зависимое от амплитуды .....	206
15.6	Четырехквadrантный режим .....	207
15.7	Определение параметров выходного каскада мощности .....	209
15.8	Схемы управления с усилением напряжения .....	211
	Широкополосная схема управления .....	212
15.9	Повышение выходного тока интегральных операционных усилителей .....	214
	Литература .....	215
<b>16.</b>	<b>Источники питания .....</b>	<b>216</b>
16.1	Свойства сетевых трансформаторов .....	216
16.2	Сетевые выпрямители .....	218
16.2.1	Однополупериодные выпрямители .....	218
16.2.2	Мостовые выпрямители .....	219

16.2.3	Схемы выпрямителя со средней точкой .....	223
	Сдвоенная схема выпрямителя со средней точкой .....	224
16.3	Последовательные стабилизаторы напряжения .....	224
16.3.1	Простейший вариант стабилизатора .....	225
16.3.2	Стабилизатор напряжения с фиксированным выходным напряжением .....	226
16.3.3	Стабилизатор напряжения с регулируемым выходным напряжением .....	228
16.3.4	Стабилизатор с малым напряжением потерь .....	229
16.3.5	Стабилизация отрицательных напряжений .....	231
16.3.6	Симметричное разделение незаземленного напряжения .....	232
16.3.7	Стабилизатор напряжения с измерительными выводами .....	234
16.3.8	Лабораторные источники сетевого питания .....	234
16.3.9	Обзор интегральных стабилизаторов напряжения .....	236
16.4	Получение опорного напряжения .....	238
16.4.1	Источники опорного напряжения на стабилитронах .....	238
16.4.2	Источники опорного напряжения на биполярных транзисторах .....	241
16.4.3	Сводные данные об источниках опорного напряжения .....	243
16.5	Импульсные блоки питания .....	243
16.6	Импульсные стабилизаторы с вторичной коммутацией .....	245
16.6.1	Понижающий преобразователь .....	245
	Выбор параметров .....	247
16.6.2	Формирование коммутационного сигнала .....	248
16.6.3	Повышающий преобразователь .....	251
16.6.4	Инвертирующий преобразователь .....	252
16.6.5	Преобразователи напряжения с перекачкой заряда .....	253
16.6.6	Классификация импульсных стабилизаторов .....	253
16.7	Импульсные стабилизаторы с первичной коммутацией .....	256
16.7.1	Однотактный преобразователь .....	257
16.7.2	Двухтактный преобразователь .....	259
16.7.3	Высокочастотные трансформаторы .....	261
16.7.4	Силовые ключи .....	261
16.7.5	Формирование переключающего сигнала .....	266
16.7.6	Анализ потерь .....	269
16.7.7	Интегральные схемы управления .....	270
	Литература .....	272
<b>17.</b>	<b>Аналоговые ключи и устройства выборки и хранения</b> .....	<b>273</b>
17.1	Устройство ключа .....	273
17.2	Электронные ключи .....	274
17.2.1	Ключ на полевом транзисторе .....	275
17.2.2	Ключи с использованием диодов .....	279
17.2.3	Ключи на биполярных транзисторах .....	281
	Короткозамыкающий ключ .....	283
	Последовательный ключ .....	283
	Последовательный короткозамыкающий ключ .....	284
17.2.4	Дифференциальный усилитель в качестве ключа .....	284
17.3	Аналоговые ключи с усилителями .....	287
17.3.1	Высоковольтные аналоговые ключи .....	287
17.3.2	Усилители с переключаемым коэффициентом усиления .....	288
17.4	Устройства выборки и хранения .....	289
17.4.1	Основные положения .....	289

17.4.2	Практическая реализация .....	292
	Устройство выборки и хранения с интегратором .....	292
	Литература .....	294
<b>18.</b>	<b>Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи</b>	<b>295</b>
18.1	Принципы цифро-аналогового преобразования .....	295
18.2	ЦАП, использующие технологию КМОП .....	296
18.2.1	Суммирование взвешенных токов .....	296
18.2.2	ЦАП с перекидными ключами .....	297
18.2.3	Резисторная матрица .....	298
18.2.4	Резисторная матрица R-2R в инверсном режиме .....	299
18.3	Резисторная матрица для декадной связи .....	300
18.4	Цифро-аналоговые преобразователи на основе биполярной технологии .....	301
18.5	ЦАП для специальных применений .....	303
18.5.1	Обработка знаковых чисел .....	303
18.5.2	Умножающие ЦАП .....	305
18.5.3	ЦАП с операцией деления .....	306
18.5.4	ЦАП в качестве генератора функций .....	306
18.6	Точность ЦАП .....	309
18.6.1	Статические параметры .....	309
18.6.2	Динамические параметры .....	310
18.7	Принципы аналого-цифрового преобразования .....	313
18.8	Точность АЦП .....	315
18.8.1	Статические погрешности .....	315
18.8.2	Динамические погрешности .....	316
18.9	Построение АЦП .....	318
18.9.1	Параллельный способ .....	318
18.9.2	Последовательно-параллельный преобразователь .....	321
18.9.3	Метод взвешивания .....	324
18.9.4	Метод счета .....	328
	Метод компенсации (следающий АЦП) .....	328
	Метод пилообразного напряжения .....	329
	Метод двойного интегрирования .....	330
	Автоматическая коррекция нуля .....	332
	Литература .....	335
<b>19.</b>	<b>Цифровые фильтры</b>	<b>336</b>
19.1	Теорема Котельникова .....	337
19.1.1	Восстановление аналогового сигнала .....	339
19.1.2	Практические аспекты .....	340
19.2	Цифровая передаточная функция .....	342
19.2.1	Описание во временной области .....	343
19.2.2	Описание в частотной области .....	343
19.2.3	Пример фильтра нижних частот .....	344
19.3	Основные структуры фильтров .....	346
19.4	Расчет фильтров типа КИХ .....	349
19.4.1	Основные уравнения .....	350
19.4.2	Простые примеры .....	351
	Фильтр типа КИХ 1-го порядка .....	352
	КИХ фильтр 2-го порядка .....	353
19.4.3	Расчет коэффициентов фильтра .....	356
	Фильтр верхних частот .....	366

Полосовые пропускающие и режекторные фильтры .....	368
19.5 Реализация КИХ фильтров .....	370
19.5.1 Реализация параллельных КИХ фильтров .....	371
19.5.2 Реализация последовательных КИХ фильтров .....	372
19.6 Расчет БИХ фильтров .....	373
19.6.1 Расчет коэффициентов фильтра .....	374
19.6.2 БИХ фильтры в каскадных структурах .....	376
БИХ фильтр первого порядка .....	377
БИХ фильтры второго порядка .....	378
19.7 Реализация БИХ фильтров .....	380
19.7.1 БИХ фильтр из простых схемных элементов .....	380
19.7.2 Архитектура элементов высокой степени интеграции .....	384
19.8 Сравнение КИХ и БИХ фильтров .....	387
Литература .....	389
<b>20. Измерительные схемы</b> .....	<b>391</b>
20.1 Измерение напряжения .....	391
20.1.1 Преобразователь полного сопротивления .....	391
Увеличение напряжения синфазного сигнала .....	392
20.1.2 Измерение разности потенциалов .....	392
Вычитатель на операционном усилителе .....	393
Вычитание высоких напряжений .....	395
Вычитатели с дифференциальными усилителями и обратной связью .....	397
Вычитатели на переключаемых конденсаторах .....	398
20.1.3 Разделительные усилители .....	400
20.2 Измерение тока .....	403
20.2.1 Незаземленный измеритель тока с низким падением напряжения .....	403
20.2.2 Измерение тока под высоким потенциалом .....	404
20.3 Измерительные выпрямители .....	405
20.3.1 Измерение среднеарифметического значения модуля .....	405
Двухполупериодный выпрямитель с заземленным выходом .....	406
Выпрямление путем переключения знака коэффициента усиления .....	408
Широкополосный двухполупериодный выпрямитель .....	409
20.3.2 Измерение эффективного значения .....	410
Измерение истинного эффективного значения .....	411
Термопреобразование .....	414
20.3.3 Измерение пиковых значений .....	415
Измерения мгновенных пиковых значений .....	417
20.3.4 Синхронный выпрямитель .....	419
Литература .....	422
<b>21. Датчики</b> .....	<b>423</b>
21.1 Измерение температуры .....	426
21.1.1 Металлы в качестве терморезисторов с положительным ТКС .....	426
21.1.2 Терморезистор на кремниевой основе .....	427
21.1.3 Терморезистор с отрицательным ТКС .....	427
21.1.4 Применение резисторных датчиков температуры .....	428
21.1.5 Транзистор в качестве датчика температуры .....	434
21.1.6 Термоэлемент .....	438
21.1.7 Типы термоэлементов .....	443
21.2 Измерение давления .....	445

21.2.1	Устройство датчиков давления .....	445
21.2.2	Датчики давления с температурной компенсацией .....	447
21.2.3	Температурная компенсация датчиков давления .....	451
21.2.4	Стандартные датчики давления .....	454
21.3	Измерение влажности .....	455
21.3.1	Датчики влажности .....	456
21.3.2	Практические схемы емкостных датчиков влажности .....	457
21.4	Передача сигналов датчиков .....	460
21.4.1	Передача сигналов посредством гальванической связи .....	460
21.4.2	Передача сигналов с гальванической развязкой .....	464
21.5	Калибровка сигналов датчиков .....	465
21.5.1	Калибровка аналоговых сигналов .....	465
21.5.2	Компьютерная калибровка .....	469
	Литература .....	473
<b>22.</b>	<b>Электронные регуляторы</b> .....	<b>474</b>
22.1	Основы .....	474
22.2	Типы регуляторов .....	475
22.2.1	Пропорциональный регулятор .....	475
22.2.2	ПИ регуляторы .....	477
22.2.3	ПИД регулятор .....	480
22.2.4	Настраиваемый ПИД регулятор .....	482
22.3	Регулирование нелинейных объектов .....	484
22.3.1	Статическая нелинейность .....	484
22.3.2	Динамическая нелинейность .....	485
22.4	Система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) .....	487
22.4.1	Устройство выборки и хранения в качестве фазового детектора .....	489
	Динамическая характеристика .....	490
	Выбор параметров регулятора .....	490
	Вхождение в полосу захвата .....	491
22.4.2	Синхронный детектор в качестве фазового детектора .....	492
22.4.3	Частотнозависимый фазовый детектор .....	494
22.4.4	Фазовый детектор с произвольно расширяемым диапазоном измерений .....	498
22.4.5	ФАПЧ в качестве умножителя частоты .....	499
	Литература .....	500
<b>23.</b>	<b>Оптоэлектронные схемные элементы</b> .....	<b>501</b>
23.1	Основные понятия фотометрии .....	501
23.2	Фоторезисторы .....	503
23.3	Фотодиоды .....	505
23.4	Фототранзисторы .....	507
23.5	Светодиоды .....	508
23.6	Оптроны .....	509
23.7	Оптические индикаторы .....	510
23.7.1	Двоичные индикаторы .....	511
23.7.2	Аналоговые индикаторы .....	512
23.7.3	Цифровые индикаторы .....	514
23.7.4	Динамическая индикация .....	516
23.7.5	Буквенно-цифровые индикаторы .....	520
	16-сегментные индикаторы .....	520

35-точечный матричный индикатор .....	521
Литература .....	523
<b>Глава 24. Основы техники связи</b> .....	<b>524</b>
24.1 Системы связи .....	524
24.2 Каналы передачи информации .....	527
24.2.1 Проводная линия .....	527
Волновое сопротивление и скорость распространения .....	528
Волновое сопротивление линии .....	528
Уравнение электрической линии .....	529
Затухание .....	532
Параметры линии связи .....	533
Представление линии связи в виде четырехполюсника .....	534
Проводная линия с нагрузкой .....	534
Полосковая линия .....	537
24.2.2 Беспроводное соединение .....	538
Антенны .....	539
Передача мощности по беспроводному каналу связи .....	541
Частотные диапазоны .....	543
24.2.3 Оптоволоконный канал .....	544
Световоды .....	545
Спектральные окна .....	548
24.2.4 Сравнение каналов передачи данных .....	549
24.3 Коэффициент отражения и S-параметры .....	550
24.3.1 Волновые характеристики .....	550
Представление с помощью напряжения и тока .....	550
24.3.2 Коэффициент отражения .....	551
Плоскость коэффициента отражения ( $\Gamma$ -плоскость) .....	552
Влияние линии на коэффициент отражения .....	554
Соотношения для стоячих волн .....	556
24.3.3 Источник волн .....	557
Независимая волна источника волн .....	558
Мощность при согласованной нагрузке .....	558
24.3.4 S-параметр .....	559
S-матрица .....	560
Измерение S-параметров .....	562
Связь с Y-параметрами .....	562
S-параметры транзистора .....	562
24.4 Методы модуляции .....	566
24.4.1 Амплитудная модуляция .....	571
Представление во временной области .....	571
Представление в частотной области .....	572
Модуляция .....	573
Демодуляция .....	574
24.4.2 Частотная модуляция .....	578
Временное представление .....	579
Изображение в полосе частот .....	579
Модуляция .....	582
Детектирование .....	583
24.4.3 Цифровые методы модуляции .....	586
Простые методы манипуляции .....	587

Синфазно-квадратурное представление цифровых методов модуляции .....	589
Формирование импульсов .....	595
Простой QPSK-модулятор .....	601
24.5 Совместное использование и группирование каналов передачи .....	603
24.5.1 Методы уплотнения каналов связи .....	604
Временное уплотнение каналов связи .....	604
Кодовое уплотнение каналов .....	606
24.5.2 Дуплексная связь .....	612
Частотный дуплекс .....	612
Литература .....	613
<b>Глава 25. Передатчики и приемники</b> .....	<b>614</b>
25.1 Передатчик .....	614
25.1.1 Передатчик с аналоговой модуляцией .....	614
Передатчик с непосредственной модуляцией .....	614
Передатчик с промежуточной частотой .....	615
Передатчик с двойным преобразованием частоты .....	617
Передатчик с переменной излучаемой частотой .....	619
25.1.2 Передатчик с цифровой модуляцией .....	620
25.1.3 Генерация частот гетеродина .....	621
25.2 Приемник .....	622
25.2.1 Радиоприемник прямого усиления .....	623
25.2.2 Супергетеродинные приемники .....	624
Фильтр высокой частоты .....	624
Предусилитель .....	626
Фильтр промежуточной частоты .....	627
Супергетеродин с двойным преобразованием частоты .....	628
Генерация сигнала гетеродина .....	630
25.2.3 Регулировка коэффициента усиления .....	630
Характеристики регулирования .....	630
Усилитель с регулируемым усилением .....	632
Устройство регулировки коэффициента усиления в приемнике .....	634
Определение уровня сигнала .....	635
Цифровая регулировка усиления .....	635
25.2.4 Динамический диапазон радиоприемника .....	637
Коэффициент шума радиоприемника .....	637
Минимальный уровень принимаемого сигнала .....	638
Максимальный уровень принимаемого сигнала .....	640
Динамический диапазон .....	642
25.2.5 Приемники с цифровой модуляцией .....	643
Приемники с цифровыми канальными фильтрами .....	645
Приемник с дискретизацией ПЧ и цифровыми канальными фильтрами .....	650
Сравнение приемников сигналов с цифровой модуляцией .....	655
Приемник прямого преобразования .....	655
Литература .....	659
<b>Глава 26. Пассивные элементы</b> .....	<b>660</b>
26.1 Высокочастотные эквивалентные схемы .....	660
26.1.1 Резистор .....	661
26.1.2 Катушки .....	663

26.1.3	Конденсатор .....	666
26.2	Фильтры .....	667
26.2.1	LC-фильтры .....	668
	Двухконтурный полосовой фильтр .....	668
	Фильтры в виде длинных линий .....	673
26.2.2	Диэлектрические фильтры .....	673
26.2.3	Фильтры ПАВ .....	676
26.3	Схемы преобразования полного сопротивления .....	679
26.3.1	Согласование .....	679
	Согласующие цепи с двумя элементами .....	680
	Фильтр Коллинза .....	682
	Согласование с помощью полосковых линий .....	685
26.3.2	Подключение нагрузки .....	689
	Подключение с емкостным делителем напряжения .....	689
	Подключение с индуктивным делителем напряжения .....	690
	Подключение с нерегулируемым индуктивным делителем напряжения .....	691
26.4	Делитель мощности и гибриды .....	691
26.4.1	Делители мощности .....	692
	Делитель Уилкинсона .....	693
	Делители мощности с потерями, собранные на резисторах .....	693
26.4.2	Гибриды .....	694
	S-параметры гибрида .....	694
	Гибриды с катушками и конденсаторами .....	696
	Гибриды на линиях .....	696
	Литература .....	697
<b>Глава 27. Высокочастотные усилители</b>		<b>698</b>
27.1	Интегральные высокочастотные усилители .....	698
27.1.1	Согласование .....	700
	Согласование по входу .....	700
	Согласование по выходу .....	701
27.1.2	Коэффициент шума .....	702
27.2	Высокочастотный усилитель на одиночном транзисторе .....	704
27.2.1	Обобщенный одиночный транзистор .....	705
27.2.2	Установка рабочей точки .....	706
	Отрицательная обратная связь по постоянному току .....	707
	Отрицательная обратная связь по постоянному напряжению .....	708
	Установка рабочей точки .....	708
27.2.3	Согласование однокаскадного усилителя .....	709
	Условия согласования .....	710
	Коэффициенты отражения транзистора .....	710
	Расчет согласования .....	711
	Стабильность на рабочей частоте .....	711
	Расчет согласующего четырехполюсника .....	712
	Устойчивость во всем диапазоне частот .....	713
	Усиление мощности .....	713
27.2.4	Согласование многокаскадных усилителей .....	718
	Согласование с помощью последовательной индуктивности .....	718
27.2.5	Нейтрализация .....	720
	Схемы нейтрализации .....	720

	Коэффициент усиления при нейтрализации .....	721
27.2.6	Специальные схемы, улучшающие согласование .....	722
	Согласование с помощью циркулятора .....	722
	Согласование с помощью 90-градусных гибридов .....	723
27.2.7	Шумы .....	724
	Шумовые параметры и коэффициент шума .....	725
	Проектирование малошумящего усилителя .....	725
27.3	Широкополосные усилители .....	728
27.3.1	Принцип действия широкополосного усилителя .....	728
27.3.2	Реализация широкополосного усилителя .....	730
27.4	Усиление мощности .....	733
27.4.1	Коэффициент усиления выходной мощности .....	735
27.4.2	Вносимое усиление .....	735
27.4.3	Коэффициент передачи .....	736
27.4.4	Усиление доступной мощности .....	737
27.4.5	Сравнение определений коэффициентов усиления .....	737
27.4.6	Коэффициент усиления при двустороннем согласовании .....	738
27.4.7	Максимальный коэффициент усиления мощности транзисторами .....	739
	Максимальный коэффициент вносимого усиления .....	739
	Максимальный коэффициент устойчивого усиления мощности .....	740
	Коэффициент однонаправленного усиления мощности .....	740
	Граничные частоты .....	741
	Литература .....	741

## **Глава 28. Смесители 742**

28.1	Принцип действия идеального смесителя .....	742
28.1.1	Повышающий смеситель .....	743
28.1.2	Понижающий смеситель .....	744
28.2	Принцип действия практических смесителей .....	746
28.2.1	Аддитивное смешивание .....	746
	Уравнения, описывающие аддитивное смешивание .....	746
	Нелинейность .....	747
	Практическая реализация .....	750
28.2.2	Мультипликативное смешивание .....	754
	Уравнения мультипликативного смешивания .....	756
	Характеристика коммутационного процесса переключателя .....	757
	Нелинейность .....	758
	Практическая реализация .....	759
28.3	Смесители на диодах .....	760
28.3.1	Однотактный смеситель .....	760
	Цепь гетеродина .....	761
	Малосигнальная эквивалентная схема .....	764
	Малосигнальные характеристики .....	765
	Коэффициент усиления при преобразовании .....	767
	Усиление мощности при преобразовании .....	767
	Сравнение с идеальным переключателем .....	770
	Недостатки однотактного смесителя .....	771
28.3.2	Балансный смеситель .....	771
	Цепь гетеродина .....	773
	Малосигнальные эквивалентная схема и характеристика .....	773
	Достоинства и недостатки балансного смесителя .....	775

28.3.3	Кольцевые смесители .....	775
	Цепь гетеродина .....	777
	Малосигнальные эквивалентная схема и характеристика .....	777
	Широкополосный режим .....	780
28.3.4	Реализация диодных смесителей .....	781
28.4	Смесители на транзисторах .....	784
28.4.1	Балансный смеситель .....	784
	Расчет передаточной характеристики .....	785
	Прямоугольное напряжение гетеродина .....	786
	Синусоидальное напряжение гетеродина .....	788
	Малосигнальная характеристика .....	788
	Усиление при преобразовании .....	789
	Ширина полосы пропускания .....	790
	Согласование .....	790
	Усиление при преобразовании .....	792
	Практическая реализация .....	794
	Балансный смеситель с трансформаторами .....	796
	Несовершенство балансного смесителя на транзисторах .....	798
28.4.2	Двойной балансный смеситель (смеситель Гильберта) .....	798
	Расчет переходной характеристики .....	800
	Малосигнальная характеристика .....	802
	Усиление при преобразовании .....	803
	Ширина полосы пропускания .....	803
	Двойной балансный смеситель в интегральных схемах .....	804
	Согласование .....	805
	Коэффициент усиления при преобразовании .....	808
	Синфазно-квадратурный смеситель с двойным балансным смесителем .....	809
	Литература .....	811

## **Глава 29. Приложения 812**

29.1	Введение в программу PSpice .....	812
29.1.1	Общие сведения .....	812
29.1.2	Программы и данные .....	812
	Spice .....	812
	PSpice .....	813
29.1.3	Пример моделирования .....	814
	Ввод схемы .....	814
	Ввод инструкций по моделированию .....	820
	Запуск моделирования .....	824
	Отображение результатов .....	824
	Отображение рабочей точки .....	829
	Таблица соединений и выходной файл .....	830
29.1.4	Дополнительные примеры моделирования .....	833
	Характеристики транзистора .....	833
	Применение параметров .....	834
29.1.5	Привязка дополнительных библиотек .....	835
29.1.6	Некоторые типичные ошибки .....	840
29.2	Краткое введение к DesignExpert .....	841
29.2.1	Общие положения .....	841
29.2.2	Ввод схемы .....	844

Язык описания аппаратных средств .....	844
Диаграмма состояний на языке Abel .....	848
Таблица истинности .....	851
Построение схемы соединений с помощью Schematic Editor .....	851
Библиотеки схемных элементов .....	854
Иерархия .....	856
29.2.3 Цоколевка .....	857
Язык Abel.....	858
Редактор Schematic .....	859
Редактор Constraint Editor .....	860
29.2.4 Моделирование .....	860
Тестовые векторы .....	862
Просмотрщик Waveform Viewer .....	863
Частотно-временной анализ .....	865
29.2.5 Оптимизация .....	866
29.2.6 Программирование .....	867
29.2.7 Перспективы .....	870
29.3 Пассивные RC- и RLC-цепи .....	871
29.3.1 Фильтр нижних частот (ФНЧ) .....	871
Частотная характеристика .....	871
Временные зависимости .....	872
29.3.2 Фильтр верхних частот .....	875
Последовательное включение нескольких ФВЧ .....	877
29.3.3 Компенсированный делитель напряжения .....	877
29.3.4 Пассивный полосовой RC-фильтр .....	878
29.2.5 Мост Вина-Робинсона .....	879
29.3.6 Двойной Т-образный фильтр .....	880
29.3.7 Колебательный контур .....	881
29.4 Интерпретация использованных величин .....	883
29.5 Логические ИС семейства 7400 .....	891
Семейства от различных изготовителей .....	891
ИС, упорядоченные по функциям.....	892
29.6 Перечень стандартных номиналов .....	906
29.7 Цветовая маркировка резисторов .....	907
29.8 Изготовители и дистрибьюторы .....	909
Литература .....	933