

Предисловие к 12-му изданию

Электроника средств связи занимает все более важное место в современном мире; в первую очередь это относится к беспроводным приемопередающим системам. Раньше приемники и передатчики для таких систем представляли собой аналоговые устройства и ориентировались на соответствующие способы модуляции сигнала. В отличие от прежних современные приемники и передатчики содержат высокочастотный аналоговый блок (Frontend), схема которого почти не зависит от способа модуляции, и цифровой блок, в состав которого входит процессор цифрового сигнала с соответствующим программным обеспечением. В этом блоке осуществляется модуляция или демодуляция методами цифровой обработки сигналов.

Высокочастотную часть составляют усилители, смесители и фильтры. Свойства этих компонентов на высокой частоте описываются особым образом: вместо полных сопротивлений используются коэффициенты отражения, а четырехполюсники характеризуются S-параметром. Сопротивления отдельных компонентов должны быть согласованы с волновым сопротивлением линий связи во избежание отражений на высоких частотах. Этим вопросам уделяется должное внимание в новом разделе, посвященном схемам, применяемым в технике связи. Рассмотрение части основной полосы частот предваряется введением в аналоговые способы модуляции, используемые в традиционных системах (например, в радиовещании с частотной модуляцией), и в цифровые способы модуляции, применяемые в современных системах (в частности, в мобильной связи).

Глава об усилителях дополнена разделом, посвященным шумам отдельных каскадов усиления и многокаскадных усилителей. Обновлено описание методики расчета параметров многокаскадных усилителей при наличии отрицательной обратной связи.

Наряду с популярным программным продуктом PSpice для анализа аналоговых схем приводится программа DesignExpert, помогающая проектировать цифровые схемы, а также дается перевод краткого руководства к ней.

Обновления и дополнения доступны на сайте авторов www.Springer.de/engine-de/tietze-schenk/. Ваши пожелания и замечания об ошибках просим высылать по адресу электронной почты tietze-schenk@springer.de.

Мы выражаем признательность издательству SpringerVerlag, отдельное спасибо д-ру Меркле (Merkle) за приятное сотрудничество и г-ну Соссна (Sossna), РТП-Berlin, за тщательный набор. Особой благодарности заслуживает г-н Эберхард Гамм (Eberhard Gamm) за его вклад в новую главу, посвященную технике связи. Мы также благодарим читателей за сведения об ошибках и советы по улучшению книги: они тщательно проверяются и учитываются.

*У. Титце, К. Шенк,
Эрланген и Мюнхен, январь 2002 г.*

Содержание

1. Диоды	17
1.1 Свойства диодов	18
1.1.1 Характеристики	18
1.1.2 Описание диода с помощью уравнений	19
1.1.3 Режим переключения	22
Режим переключения при омической нагрузке	22
Режим переключения при омическо-индуктивной нагрузке	24
1.1.4 Режим малых сигналов	25
1.1.5 Предельные параметры и токи запирания	25
Предельные напряжения	25
Предельные токи	26
Ток запирания	26
Максимальная мощность рассеяния	26
1.1.6 Тепловые свойства	27
1.1.7 Температурная зависимость параметров диодов	27
1.2 Устройство диода	28
1.2.1 Дискретные диоды	28
Внутренняя структура	29
Корпус	29
1.2.2 Интегральные диоды	30
Внутренняя структура	30
Диод-подложка	30
Интегральный диод с р-п переходом и диод Шоттки	30
1.3 Модель диода	31
1.3.1 Статический режим	31
Диапазон средних значений прямых токов	31
Дополнительные эффекты	32
Эффект сильного тока	32
Ток утечки	32
Пробой	33
Прямое сопротивление	34
1.3.2 Динамическая характеристика	34
Барьерная емкость	35
Диффузионная емкость	36
Полная модель диода	36
1.3.3 Модель диода в режиме малых сигналов	38
Статическая модель режима малых сигналов	38
Динамическая модель диода в режиме малых сигналов	40
1.4 Специальные диоды и их применение	40
1.4.1 Стабилитроны	41
1.4.2 рiп-диод	44
1.4.3 Варикапы	45
1.4.4 Мостовые выпрямители	48
1.4.5 Смесители	49
Литература	51

2. Биполярные транзисторы	52
2.1 Свойства биполярных транзисторов	53
2.1.1 Характеристики транзисторов	53
2.1.2 Описание транзистора с помощью уравнений	55
2.1.3 Зависимость усиления по току	56
2.1.4 Рабочая точка и характеристики транзистора в режиме малых сигналов	58
Уравнения и параметры режима малых сигналов	60
Эквивалентная схема режима малых сигналов	62
Матрицы, описывающие четырехполюсники	63
Границы применимости концепции режима малых сигналов	64
2.1.5 Предельные параметры и обратные токи	64
Пробивные напряжения	65
Пробой второго рода	66
Предельные токи	66
Токи отсечки	66
Максимальная рассеиваемая мощность	67
Допустимый рабочий диапазон	67
2.1.6 Тепловые свойства транзисторов	69
Тепловые характеристики в статическом режиме	71
Тепловые характеристики в импульсном режиме	71
2.1.7 Температурная зависимость параметров транзистора	73
2.2 Устройство биполярного транзистора	74
2.2.1 Дискретные транзисторы	74
2.2.2 Интегральные транзисторы	76
2.3 Модели биполярных транзисторов	78
2.3.1 Статические свойства	78
Модель Эберса–Молла	78
Транспортная модель	81
Дополнительные эффекты	82
Усиление по току в нормальном режиме	85
Диоды-подложки	87
Объемные сопротивления	87
2.3.2 Динамические характеристики	89
Барьерные емкости	89
Диффузионные емкости	91
Модель Гуммеля–Пуна	93
2.3.3 Модель транзистора для режима малых сигналов	96
Статическая модель транзистора для режима малых сигналов	96
Динамическая модель транзистора для режима малых сигналов	98
Граничные частоты в режиме малых сигналов	100
Сводка параметров для режима малых сигналов	104
2.3.4 Шумы	105
Спектральная плотность шумов	105
Источники шумов биполярного транзистора	107
Эквивалентные источники шумов	108
Эквивалентный источник шума и коэффициент шума	109
Коэффициент шума биполярного транзистора	111
Определение объемного сопротивления базы	118
2.4 Типовые схемы	118
2.4.1 Схема с общим эмиттером	119

	Передаточная характеристика схемы с общим эмиттером	120
	Характеристики режима малых сигналов схемы с общим эмиттером ..	122
	Отрицательная обратная связь по току в схеме с общим эмиттером	125
	Схема с общим эмиттером и ООС по напряжению	131
	Частотная характеристика и верхняя граничная частота	147
	Заключение	154
2.4.2	Схема усилителя с общим коллектором	156
	Передаточная характеристика схемы с общим коллектором	156
	Характеристики схемы с общим коллектором в режиме малых сигналов	159
	Установка рабочей точки	163
	Частотная характеристика и верхняя граничная частота	165
	Преобразование импеданса посредством схемы с общим коллектором	172
2.4.3	Схема с общей базой	173
	Передаточная характеристика схемы с общей базой	174
	Режим малых сигналов схемы с общей базой	177
	Установка рабочей точки	180
	Частотная характеристика и верхняя граничная частота	182
2.4.4	Схема Дарлингтона	186
	Характеристики транзистора Дарлингтона	187
	Описание с помощью уравнений	189
	Зависимость усиления по току от тока коллектора	189
	Параметры режима малых сигналов	191
	Режим коммутации	193
	Литература	194
3.	Полевые транзисторы	196
3.1	Свойства полевых транзисторов	199
3.1.1	Характеристики	199
3.1.2	Описание транзистора с помощью уравнений	202
3.1.3	Полевой транзистор в качестве управляемого резистора	207
3.1.4	Рабочая точка и режим малых сигналов	209
	Рабочая точка	209
	Уравнения и параметры режима малых сигналов	210
	Эквивалентная схема полевого транзистора для режима малых сигналов	212
	Матрицы, описывающие четырехполюсники	212
	Границы применимости концепции малых сигналов	213
3.1.5	Граничные параметры и обратные токи	213
	Напряжения пробоя	214
	Граничные токи	215
	Обратные токи	216
	Максимальная мощность рассеяния	216
	Область устойчивой работы	217
3.1.6	Тепловые свойства	218
3.1.7	Температурная зависимость параметров полевых транзисторов	218
	МОП транзистор	218
	Полевой транзистор с управляющим р-п переходом	220
3.2	Устройство полевого транзистора	221
3.2.1	Интегральные МОП транзисторы	221
3.2.2	Дискретные МОП транзисторы	223

3.2.3	Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом	226
3.2.4	Корпус	227
3.3	Модели полевых транзисторов	227
3.3.1	Статические свойства	227
	Модель МОП транзистора Уровня 1	228
	Объемные сопротивления	233
	Вертикальные мощные МОП транзисторы	234
	Полевые транзисторы с управляющим р-п переходом	236
3.3.2	Динамический режим	237
	Модель МОП транзистора Уровня 1	241
	Модель полевого транзистора с управляющим р-п переходом	246
3.3.3	Модель МОП транзистора для режима малых сигналов	247
	Статическая модель МОП транзистора для режима малых сигналов в области насыщения	247
	Динамическая модель МОП транзистора для режима малых сигналов в области насыщения	249
	Граничные частоты при режиме малых сигналов	251
	Сводный перечень параметров МОП транзистора для малых сигналов	253
3.3.4	Шумы	256
	Источники шумов полевого транзистора	256
	Эквивалентные источники шумов	257
	Коэффициент шума полевого транзистора	258
	Упрощенное описание	261
	Сопоставление коэффициентов шума полевых и биполярных транзисторов	262
3.4	Типовые схемы	262
3.4.1	Схема с общим истоком	263
	Передаточные характеристики схемы с общим истоком	264
	Режим схемы с общим истоком для малых сигналов	265
	Схема с общим истоком и отрицательной обратной связью по току	268
	Схема с общим истоком и обратной связью по напряжению	272
	Установка рабочей точки	277
	Частотная зависимость и граничная частота	279
	Заключение	285
3.4.2	Схема с общим стоком	286
	Передаточная характеристика схемы с общим стоком	286
	Режим малых сигналов схемы с общим стоком	288
	Установка рабочей точки	290
	Частотная зависимость и граничная частота	291
3.4.3	Схема с общим затвором	296
	Передаточная характеристика схемы с общим затвором	297
	Режим малых сигналов схемы с общим затвором	299
	Установка рабочей точки	301
	Частотная характеристика и граничная частота	301
	Литература	304
4.	Усилители	305
4.1	Схемы	308
4.1.1	Источники тока и токовое зеркало	314
	Принцип действия токового зеркала	314
	Простые источники тока для схем на дискретных элементах	318

	Простые схемы токового зеркала	319
	Токовое зеркало на основе каскодной схемы	332
	Каскодное токовое зеркало	335
	Токовое зеркало Вильсона	342
	Динамический режим	344
	Токовые зеркала и источники тока других типов	345
4.1.2	Каскодная схема	353
	Режим малых сигналов каскодной схемы	355
	Частотная зависимость усиления и граничная частота каскодной схемы	358
4.1.3	Дифференциальный усилитель	368
	Передачная характеристика n-p-n дифференциального усилителя	372
	Дифференциальный усилитель с активной нагрузкой	383
	Напряжение смещения нуля дифференциального усилителя	385
	Дифференциальный усилитель в режиме малых сигналов	387
	Установка рабочей точки	406
	Частотная характеристика и граничные частоты дифференциального усилителя	415
	Краткие выводы	432
4.1.4	Преобразователь полного сопротивления	433
	Однокаскадный преобразователь полного сопротивления	433
	Многоступенчатые преобразователи полного сопротивления	434
	Комплементарный преобразователь полного сопротивления	438
4.1.5	Схемы для установки рабочей точки	444
	Источник опорного тока, использующий напряжение UBE	445
	Источник опорного тока, пропорционального температуре	450
	Температурно-независимые источники опорного тока	455
	Источники опорного тока на МОП схемах	456
	Источники тока с насыщением	457
	Установка рабочей точки в интегральных схемах усилителей	458
4.2	Свойства и параметры усилителя	459
4.2.1	Характеристики усилителя	460
4.2.2	Малосигнальные параметры	463
	Рабочая точка	463
	Малосигнальные переменные	464
	Линеаризация	464
	Малосигнальные параметры	464
	Малосигнальная эквивалентная схема усилителя	465
	Усилители с обратной связью	468
	Расчет малосигнальных параметров с помощью малосигнальной эквивалентной схемы	470
	Последовательное включение усилителей	473
4.2.3	Нелинейные параметры	478
	Разложение передачной характеристики в ряд в рабочей точке	479
	Выходной сигнал при синусоидальном входном сигнале	480
	Коэффициент нелинейных искажений	483
	Точка сжатия	486
	Интермодуляция и точки перехвата	486
	Последовательное включение усилителей	491
4.2.4	Шумы	495

	Источник и плотность шумов усилителя	495
	Эквивалентный источник шумов и коэффициент шума	496
	Оптимальный коэффициент шума	
	и оптимальное внутреннее сопротивление источника	500
	Коэффициент шума последовательной цепочки усилителей	503
	Оптимизация коэффициента шума	507
	Эквивалентные источники шума типовых схем	516
	Средний коэффициент шума и отношение сигнал-шум	536
	Литература	540
5.	Операционные усилители	541
5.1	Общие сведения	541
5.1.1	Типы операционных усилителей	543
5.1.2	Принцип обратной связи	546
	Неинвертирующий усилитель	547
	Инвертирующий усилитель	549
5.2	Стандартные операционные усилители	551
5.2.1	Принцип действия	552
5.2.2	Универсальный усилитель	554
5.2.3	Напряжения питания	557
5.2.4	Усилитель с одним источником питания	558
	Инверсия фазы	559
5.2.5	Усилитель с размахом, равным напряжению питания	561
5.2.6	Широкополосные операционные усилители	565
5.2.7	Коррекция частотной характеристики	571
	Основные положения	571
	Универсальная коррекция частотной характеристики	574
	Расщепление полюсов	575
	Согласованная коррекция частотной характеристики	577
	Скорость нарастания выходного напряжения	577
	Емкостная нагрузка	581
	Внутренняя коррекция нагрузки	584
	Двухполюсная коррекция частотной характеристики	585
5.2.8	Параметры операционных усилителей	586
	Усиление разностного и синфазного сигналов	589
	Входное напряжение смещения нуля	592
	Входные токи	594
	Входные сопротивления	596
	Выходное сопротивление	598
	Примеры статических погрешностей	599
	Ширина полосы пропускания	601
	Шумы	603
5.3	Усилитель крутизны	606
5.3.1	Внутреннее устройство	607
5.3.2	Типовые применения	610
5.4	Усилитель полного сопротивления	611
5.4.1	Внутреннее устройство	611
5.4.2	Частотные характеристики	615
5.4.3	Типовые применения	618
5.5	Усилитель тока	619
5.5.1	Внутреннее устройство	620

5.5.2	Типовые применения	622
	Использование схем с обратной связью по току	622
	Использование обратной связи по напряжению	630
5.6	Сопоставления	633
5.6.1	Практические применения	639
5.6.2	Разновидности операционных усилителей	642
	Классификация	657
	Литература	659
6.	Релаксационные схемы	660
6.1	Транзистор как элемент цифровой схемы	660
	Динамические свойства	662
6.2	Релаксационные схемы с насыщенными транзисторами	663
6.2.1	Бистабильные релаксационные схемы	664
	Триггер	664
	Триггер Шмитта	666
6.2.2	Моностабильные релаксационные схемы	667
6.2.3	Астабильная релаксационная схема	668
6.3	Релаксационные схемы на транзисторах с эмиттерной связью	669
6.3.1	Триггер Шмитта с эмиттерной связью	669
6.3.2	Мультивибратор с эмиттерной связью	670
6.4	Релаксационные схемы на логических элементах	671
6.4.1	Триггеры	672
6.4.2	Одновибратор	672
6.4.3	Мультивибратор	673
6.5	Релаксационные схемы на компараторах	675
6.5.1	Компараторы	675
	Двухпороговый компаратор	677
6.5.2	Триггер Шмитта	677
	Инвертирующий триггер Шмитта	677
	Неинвертирующий триггер Шмитта	678
	Прецизионный триггер Шмитта	680
6.5.3	Мультивибраторы	680
	Мультивибратор с прецизионным триггером Шмитта	682
6.5.4	Одновибраторы	683
	Одновибратор с послезапуском	684
	Литература	685
7.	Основы цифровой техники	686
7.1	Основные логические функции	686
7.2	Составление логических функций	689
7.2.1	Таблица Карно	691
7.3	Основные производные функции	693
7.4	Схемотехническая реализация основных логических функций	694
7.4.1	Резисторно-транзисторная логика	696
7.4.2	Диодно-транзисторная логика	697
7.4.3	Медленнодействующая помехоустойчивая логика	697
7.4.4	Транзисторно-транзисторная логика	698
	Выходы с открытым коллектором	699
	Трехстабильные выходы	701
7.4.5	Эмиттерно-связанная логика	702
	Функция «монтажное» ИЛИ	705

7.4.6	Комплементарная МОП логика	706
	Меры предосторожности при работе с КМОП схемами	708
	Логические КМОП элементы	709
	Логический ключ	709
7.4.7	n-канальная МОП логика	710
7.4.8	Заключительный обзор	711
7.5	Межсоединения	713
	Литература	715
8.	Комбинационные логические схемы	716
8.1	Представление чисел	718
8.1.1	Положительные целые числа в двоичном коде	718
	Восьмеричный код	718
	Шестнадцатеричный код	718
8.1.2	Положительные целые числа в двоично-десятичном коде	719
8.1.3	Целые двоичные числа с произвольным знаком	719
	Представление модуля и знака	719
	Представление с поразрядным дополнением до двух	720
	Расширение знакового разряда	721
	Смещенный двоичный код	722
8.1.4	Двоичные числа с фиксированной запятой	722
8.1.5	Двоичные числа с плавающей запятой	723
8.2	Мультиплексор	726
8.2.1	Дешифратор «один из n»	726
8.2.2	Демультиплексор	727
8.2.3	Мультиплексоры	728
8.3	Приоритетный дешифратор	729
8.4	Регистры сдвига	730
8.5	Компараторы	732
8.6	Сумматоры	734
8.6.1	Полусумматоры	734
8.6.2	Полный сумматор	735
8.6.3	Логика параллельного переноса	736
8.6.4	Вычитание	738
8.6.5	Переполнение при сложении чисел в дополнительном коде	739
8.6.6	Сложение и вычитание чисел с плавающей запятой	740
8.7	Умножители	740
8.7.1	Умножение чисел с фиксированной запятой	740
8.7.2	Умножение чисел с плавающей запятой	743
	Литература	743
9.	Переключающие схемы	744
9.1	Интегральные триггеры	744
9.1.1	Статические триггеры	744
	Синхронный RS-триггер	745
	Синхронный D-триггер	746
9.1.2	Триггеры с временным запоминанием	746
	Триггеры, срабатывающие по двум фронтам импульса	747
	Триггеры, срабатывающие по одному фронту импульса	749
9.2	Двоичные счетчики	752
9.2.1	Асинхронный двоичный счетчик	753
9.2.2	Синхронный двоичный счетчик	754

9.2.3	Реверсивные счетчики	756
	Счетчики с переключаемым направлением счета	757
	Счетчики с входами прямого и обратного счета	758
	Устранение совпадений	758
	Метод вычитания	760
9.3	Двоично-десятичный счетчик в коде 8421	760
9.3.1	Асинхронный двоично-десятичный счетчик	761
9.3.2	Синхронный двоично-десятичный счетчик	762
9.4	Счетчики групп	763
9.5	Регистры сдвига	765
9.5.1	Принципиальная схема	765
9.5.2	Регистр сдвига с параллельным вводом	766
9.6	Обработка асинхронных сигналов	766
9.6.1	Устранение вибраций механических контактов	767
9.6.2	RS-триггер с запуском по фронту импульса	768
9.6.3	Синхронизация импульсов	768
9.6.4	Синхронный одновибратор	769
9.6.5	Синхронный детектор изменений	771
9.6.6	Синхронный тактовый переключатель	771
9.7	Системное проектирование последовательностных схем	772
9.7.1	Диаграмма состояний	772
9.7.2	Пример проектирования счетчика групп	774
9.7.3	Сокращение потребности в объеме памяти	777
	Входной мультиплексор	778
9.8	Обозначения зависимостей	780
	Литература	783
10.	Полупроводниковые запоминающие устройства	784
10.1	Оперативные запоминающие устройства	786
10.1.1	Статические ОЗУ	786
	Временные условия	789
10.1.2	Динамические ОЗУ	792
	Контроллер динамического ОЗУ	792
10.2	Расширение возможностей ОЗУ	796
10.2.1	Двухпортовые ОЗУ	796
10.2.2	ОЗУ в качестве регистра сдвига	797
10.2.3	Память FIFO	798
	Реализация памяти FIFO на стандартных ОЗУ	800
10.2.4	Распознавание и коррекция ошибок	802
	Бит четности	802
	Код Хэмминга	804
10.3	Постоянные ЗУ	806
10.3.1	ПЗУ, программируемое фотошаблоном	807
10.3.2	Программируемое ПЗУ	807
10.3.3	Постоянное ЗУ с УФ стиранием	809
10.3.4	Электрически стираемое программируемое ПЗУ	812
10.4	Программируемые логические устройства	814
10.4.1	Программируемая матричная логика	818
10.4.2	Компьютерное проектирование ПЛУ	819
10.4.3	Обзор типов ПЛУ	821
10.4.4	Матрицы логических элементов, программируемые пользователем ..	825
	Литература	827

Глава 1

Диоды

Диод представляет собой полупроводниковый элемент с двумя выводами, один из которых называют *анодом* (А), а другой – *катодом* (К). Различают *дискретные диоды* в виде отдельного элемента, предназначенного для монтажа на плате и заключенного в собственный корпус, и *интегральные диоды*, которые вместе с другими элементами схемы изготавливаются на общей полупроводниковой подложке. У интегральных диодов имеется третий вывод, необходимый для соединения с общей подложкой. Иногда его называют *субстратом* (S), но он играет второстепенную роль в функционировании самого диода.

Устройство. Диоды представляют собой электронно-дырочный переход р-п или переход металл–полупроводник и называются соответственно диодами с р-п переходом или диодами Шоттки. Зона *p* обогащена дырками, а зона *n* – электронами. Условное графическое обозначение и структура диода показаны на рис. 1.1. Обычно зоны *p* и *n* диода с р-п переходом изготавливаются из кремния. Кроме этого существуют дискретные диоды на основе германия. Им свойственно низкое прямое падение напряжения, однако они устарели. В диодах Шоттки зона *p* заменена слоем металла, что также приводит к низкому прямому падению напряжения, поэтому они часто используются вместо германиевых диодов с р-п переходом.

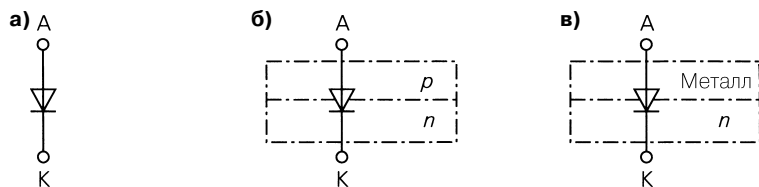


Рис. 1.1. Условное графическое обозначение и устройство диода: а – графический символ; б – диод с р-п переходом; в – диод Шоттки

На практике кремниевые диоды с р-п переходом называют просто диодами. За исключением ряда диодов особого типа, все они изображаются на схемах одним и тем же графическим символом. Диоды разного типа различают лишь по маркировке на корпусе и техническим данным.

Режимы работы. В процессе работы диод может находиться в областях проводимости, запирания и пробоя, подробное описание которых дается в следующем разделе.

Диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока, называются *выпрямительными*; они попеременно работают в областях проводимости и запирания. Диоды, сконструированные для работы в области пробоя – *стабилитроны* (диоды Зенера) применяют для стабилизации напряжения. Еще один важный класс диодов составля-

ют *варикапы*. Они функционируют в режиме запирания и благодаря зависимости емкости запирающего слоя (барьерной емкости) от приложенного напряжения могут использоваться для настройки колебательных контуров на нужную частоту. Существует также множество специальных диодов, которые здесь не рассматриваются.

1.1

Свойства диодов

Поведение диода проще всего представить с помощью его вольт-амперной характеристики, описывающей зависимость тока, протекающего через диод от приложенного к нему напряжения в случае, когда все величины постоянны или медленно меняются во времени. Для расчетов необходимы уравнения, строго описывающие поведение прибора. Чаще всего достаточно простых соотношений. Кроме того, имеется модель, хорошо воспроизводящая динамическое поведение диода под воздействием синусоидальных или импульсных сигналов. Эта модель рассматривается в разделе 1.3 и не требуется для изучения основных понятий. А теперь обратимся к поведению кремниевого диода с p-n переходом.

1.1.1

Характеристики

Если к диоду приложить напряжение $U_D = U_{AK}$ и измерить ток I_D , полагая, что на анод относительно катода поступает напряжение, мы получим характеристики, представленные на рис. 1.2. Обратите внимание на гораздо более крупный масштаб в области положительных напряжений. При $U_D > 0$ В диод работает в области проводимости. Здесь ток растет экспоненциально с напряжением. У диодов с p-n переходом заметный ток течет при $U_D > 0,4$ В. При $-U_{BR} < U_D < 0$ В диод заперт, и ток становится пренебрежимо малым. Этот участок называют *областью запирания*. Напряжение пробоя U_{BR} зависит от типа

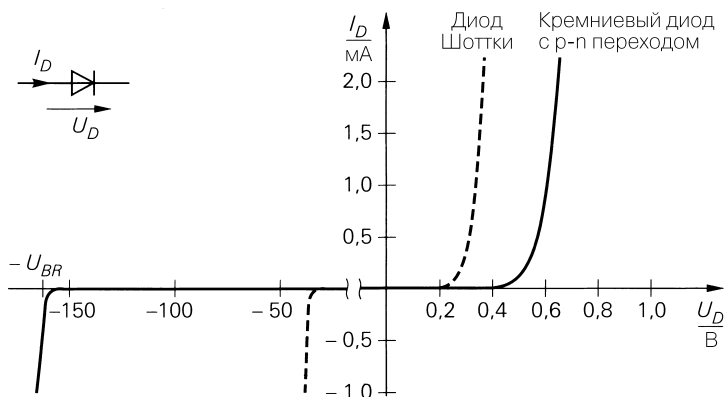


Рис. 1.2. Характеристики маломощных диодов

элемента и у выпрямительных диодов составляет от -50 до -1000 В. При $U_D < -U_{BR}$ наступает пробой диода и возникает обратный ток. В этой области способны работать длительное время только стабилитроны и варикапы. Для диодов других типов наличие обратного тока при отрицательном напряжении нежелательно. В случае германиевых диодов или диодов Шоттки заметный ток в области проводимости возникает уже при $U_D > 0,2$ В, а напряжение пробоя U_{BR} составляет от -10 до -200 В.

В области проводимости диода при средних токах напряжение оказывается почти постоянным благодаря крутому подъему характеристики. Это напряжение U_f называется *прямым*. Для германиевых диодов и диодов Шоттки оно имеет величину $U_{f,Ge} \approx U_{f,Шоттки} \approx 0,3...0,4$ В, а у кремниевых диодов $U_{f,Si} \approx 0,6...0,7$ В. У силовых диодов при токах в несколько ампер оно бывает существенно выше, так как в дополнение к внутреннему прямому напряжению появляется заметное падение напряжения на прямом сопротивлении и сопротивлении вводов диода: $U_f = U_{f,I} + I_D R_B$. В предельном случае $I_D \rightarrow \infty$ диод ведет себя, как очень малое сопротивление $R_B \approx 0,01...10$ Ом.

Область запирания в увеличенном масштабе представлена на рис. 1.3. Ток в запирающем направлении (обратный ток) $I_R = -I_D$ весьма мал при запирающем напряжении $U_R = -U_D$ и с приближением к напряжению пробоя сначала медленно увеличивается, а затем резко возрастает.

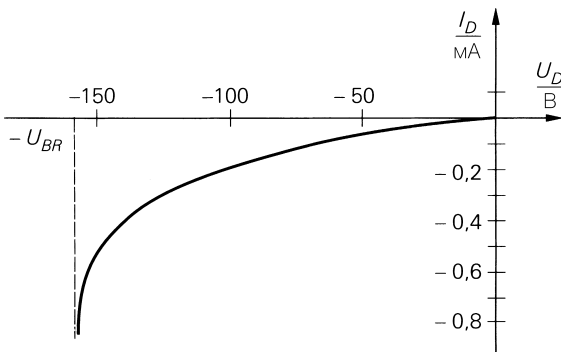


Рис. 1.3. Характеристика маломощного диода в области запирания

1.1.2

Описание диода с помощью уравнений

Характеристика диода в области $U_D > 0$ в полулогарифмическом масштабе почти линейна (рис. 1.4). Следовательно, в силу $\ln I_D \sim U_D$ (пропорционально) между I_D и U_D действует экспоненциальная зависимость. Исходя из закономерностей физики полупроводников [1.1], имеем:

$$I_D(U_D) = I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \text{ для } U_D \geq 0.$$

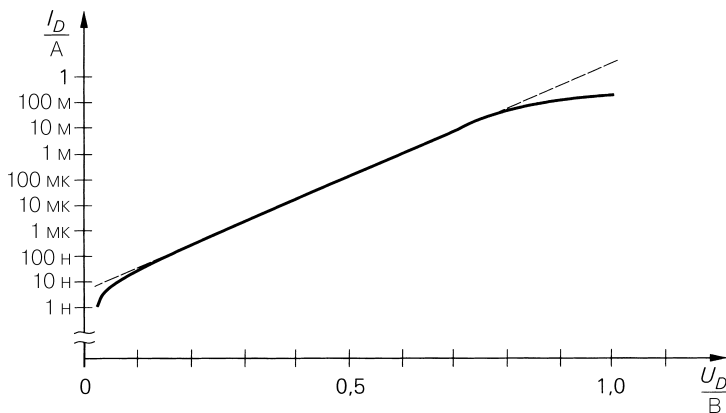


Рис. 1.4. Характеристика диода в полулогарифмическом масштабе при $U_D > 0$

Для правильного описания реальных диодов требуется поправочный коэффициент, который позволил бы привести наклон прямой в соответствие с ее представлением в полулогарифмическом масштабе [1.1]:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_D}{nU_T}} - 1 \right). \tag{1.1}$$

Здесь обратный ток насыщения I_S , $I_S \approx 10^{-12} \dots 10^{-6}$ А, коэффициент эмиссии $n \approx 1 \dots 2$ и температурное напряжение $U_T = kT/q \approx 26$ мВ при комнатной температуре.

Строго говоря, уравнение (1.1) выполняется только при $U_D \geq 0$, однако иногда его применяют и при $U_D < 0$. При $U_D \ll -nU_T$ получим постоянный ток $I_D = -I_S$, как правило, значительно меньший, нежели фактически текущий. Поэтому справедливо лишь качественное утверждение о том, что в области запирания через диод протекает малый отрицательный ток; для описания его зависимости согласно рис. 1.3 необходимы дополнительные уравнения (см. раздел 1.3).

В области проводимости соблюдается условие $U_D \gg nU_T \approx 26 \dots 52$ мВ, следовательно, можно воспользоваться приближением

$$I_D = I_S e^{\frac{U_D}{nU_T}}; \tag{1.2}$$

отсюда для напряжения получим

$$U_D = nU_T \ln \frac{I_D}{I_S} = nU_T \ln 10 \lg \frac{I_D}{I_S} \approx 60 \dots 120 \text{ мВ} \times \lg \frac{I_D}{I_S}.$$

Таким образом, при десятикратном увеличении тока напряжение возрастает на 60...120 мВ. При больших токах следует учитывать падение напряжения $I_D R_B$ на прямом сопротивлении R_B , складывающемся с падением напряжения на р-п переходе:

$$U_D = nU_T \ln \frac{I_D}{I_S} + I_D R_B.$$

В данном случае представить ток в виде функции $I_D = I_D(U_D)$ нельзя.

При несложных вычислениях диод можно рассматривать в виде ключа, разомкнутого в области запирания или замкнутого в области проводимости. Если допустить, что напряжение на диоде в области проводимости постоянно, а в области запирания ток не течет, диод легко заменить идеальным ключом, который управляется напряжением, и источником прямого напряжения U_F как показано на рис. 1.5а. Характеристика, соответствующая эквивалентной схеме, приведена на рис. 1.5б. Она состоит из двух полупрямых:

$$\begin{aligned} I_D &= 0 & \text{для } U_D < U_F & \rightarrow \text{ключ разомкнут (а)} \\ U_D &= U_F & \text{для } I_D > 0 & \rightarrow \text{ключ замкнут (б)} \end{aligned}$$

С учетом прямого сопротивления R_B получим:

$$I_D = \begin{cases} 0 & U_D < U_F \rightarrow \text{ключ разомкнут (а)} \\ \frac{U_D - U_F}{R_B} & U_D \geq U_F \rightarrow \text{ключ замкнут (б)} \end{cases}$$

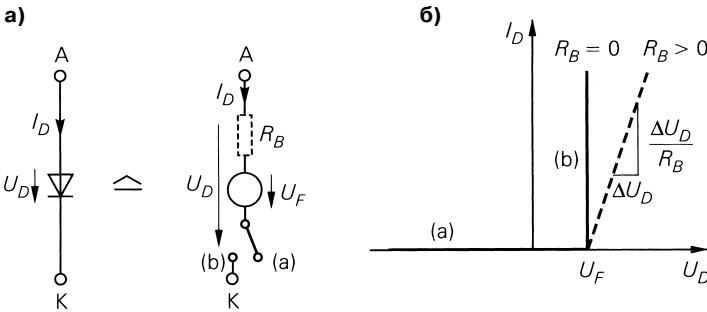


Рис. 1.5. Простая эквивалентная схема диода с прямым сопротивлением (пунктир) и без него (сплошная линия)

У кремниевых диодов с р-п переходом $U_F \approx 0,6$ В, а у диодов Шоттки $U_F \approx 0,3$ В. Соответствующая схема и характеристика выделены на рис. 1.5 пунктиром.

В обоих вариантах необходимо учитывать различия ситуаций, то есть принимать во внимание как разомкнутое, так и замкнутое состояние ключа, и находить непротиворечивое решение. Достоинство подхода в том, что оба случая описываются линейными уравнениями, которые легко решаются. Напротив, при использовании экспоненциальной зависимости согласно (1.1) появляются неявные нелинейные уравнения, поддающиеся только численному решению.

Пример. На рис. 1.6 показан диод, включенный в мостовую схему. Рассчитывая напряжения U_1 и U_2 и напряжение на диоде $U_D = U_1 - U_2$, исходят прежде всего из его способности запирает цепь. Иначе говоря, справедливо неравенство $U_D < U_F = 0,6$ В, и ключ в эквивалентной схеме разомкнут. В этом случае U_1 и U_2 определяются по формуле делителя напряжения:

$$U_1 = \frac{U_b R_2}{R_1 + R_2} = 3,75 \text{ В и } U_2 = \frac{U_b R_4}{R_3 + R_4} = 2,5 \text{ В.}$$

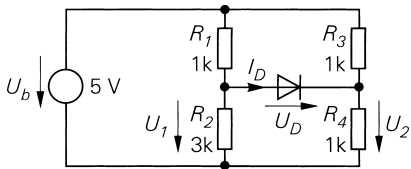


Рис. 1.6. Пример применения простой эквивалентной схемы

В результате $U_D = 1,25$ В, что противоречит исходному допущению. Затем диод считаем проводящим, а ключ в эквивалентной схеме – замкнутым. Тогда $U_D = U_F = 0,6$ В и $I_D > 0$. Используя узловые уравнения

$$\frac{U_1 + I_D}{R_2} = \frac{U_b - U_1}{R_1}, \quad \frac{U_2}{R_4} = I_D + \frac{U_b - U_2}{R_3}$$

и заменяя $U_1 = U_2 + U_F$, исключаем неизвестные I_D и U_1 и получаем

$$U_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) = U_b \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) - U_F \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Отсюда $U_2 = 2,76$ В и $U_1 = U_2 + U_F = 3,36$ В. После подстановки в одно из узловых уравнений находим $I_D = 0,52$ мА. Теперь условие $I_D > 0$ соблюдается, противоречие устранено и решение найдено.

1.1.3 Режим переключения

Во многих устройствах диоды работают попеременно в областях проводимости и запирания, примером чему служит выпрямление переменного тока. Процесс переключения не соответствует статической характеристике из-за накопления нарастающего и убывающего (при включении и выключении соответственно) заряда паразитной емкостью диода. На рис. 1.7 представлена схема, с помощью которой можно найти характеристику процесса переключения при омической ($L = 0$) и омически-индуктивной ($L > 0$) нагрузке. Питая схему напряжением прямоугольной формы, получим изменение во времени напряжения на диоде и протекающего через него тока (рис. 1.8) при $U = 10$ В, $f = 10$ МГц, $R = 1$ кОм и $L = 0$ или $L = 5$ мкГн.

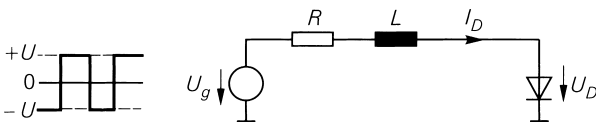


Рис. 1.7. Схема для измерения характеристики процесса переключения

Режим переключения при омической нагрузке

В случае омической нагрузки при включении питания заряжается емкость диода и, как следствие, наблюдается скачок тока. Одновременно напряжение нарастает от начального уровня, соответствующего напряжению запирания, до прямого напря-

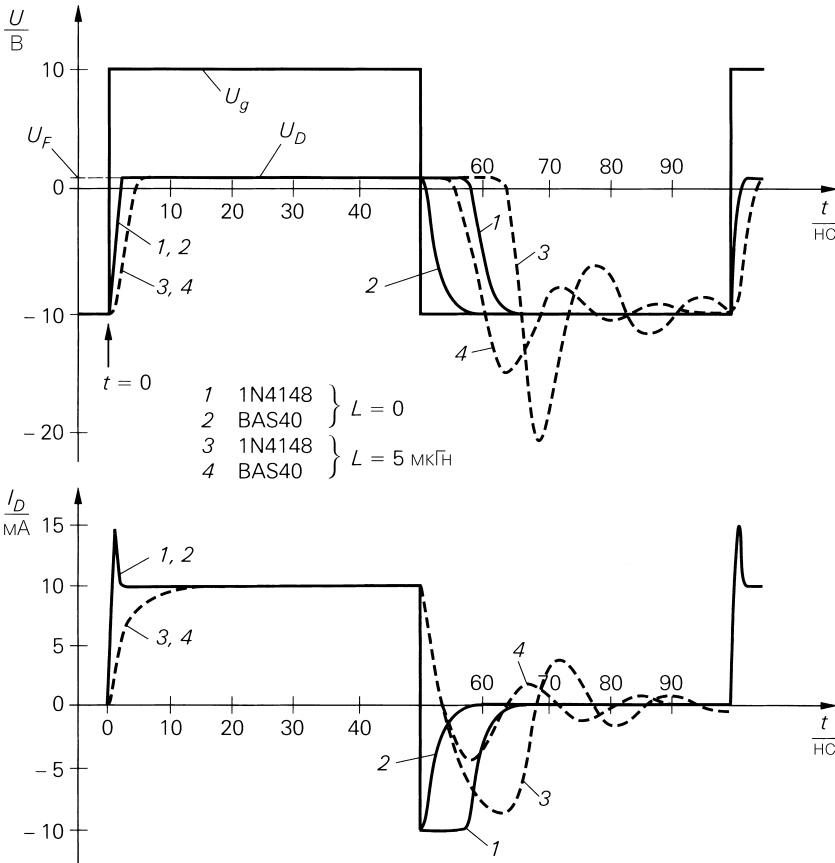


Рис. 1.8. Характеристика процесса переключения кремниевого диода 1N4148 и диода Шоттки BAS40 в схеме измерений на рис. 1.7

жения U_F , чем и завершается процесс включения. У рpn-диодов имеется беспримесный или слабопримесный слой между слоями р и п, обеспечивающий более высокое напряжение пробоя. При сильных токах рpn-диоды характеризуются избыточным прямым напряжением (рис. 1.9), так как им свойственно высокое прямое сопротивление R_B сразу после включения. Вслед за тем оно убывает, и напряжение уменьшается до своей статической величины. При выключении ток течет в обратном направлении, пока емкость не разрядится. В конечном счете ток прекращается и напряжение на диоде падает до отрицательного уровня. Поскольку емкость диодов Шоттки существенно меньше емкости кремниевых диодов, имеющих сравнимые размеры, их отличает заметно меньшее время выключения (рис. 1.8). Поэтому диоды Шоттки используются как выпрямители в высокочастотных цепях ($f > 20$ кГц), тогда как более дешевые кремниевые диоды служат выпрямителями в сетях промышленной частоты $f = 50$ Гц. Если частота настолько высока, что емкость не успевает разрядиться до следующего включения, эффект выпрямления исчезает.

Содержание

11. Линейные и нелинейные аналоговые вычислительные схемы	21
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

сопротивления	70
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 (НИС)	86
12.6 Гиратор	89
12.7 Циркуляторы	93
Литература	95
13. Активные фильтры	97
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
14.	Генераторы сигналов	164
14.1	LC-генераторы	164
14.1.1	Основные условия генерации	164
14.1.2	Схемы генераторов Мейснера	166
14.1.3	Генератор Хартлея (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
15.	Усилители мощности	193
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
16.	Источники питания	216
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
17.	Аналоговые ключи и устройства выборки и хранения	273
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
18.	Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи	295
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
19.	Цифровые фильтры	336
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
20. Измерительные схемы	391
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
21. Датчики	423
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
22.	Электронные регуляторы	474
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
23.	Оптоэлектронные схемные элементы	501
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
Глава 24. Основы техники связи	524
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 (Γ -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
Глава 25. Передатчики и приемники	614
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
Глава 26. Пассивные элементы	660
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
Глава 27. Высокочастотные усилители		698
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

Глава 11

Линейные и нелинейные аналоговые вычислительные схемы

Благодаря появлению микро-ЭВМ и сигнальных процессоров в настоящее время существует возможность выполнения математических операций практически с любой точностью. Однако обрабатываемые величины часто представляются в виде непрерывных сигналов, например в форме аналогового электрического напряжения. В этом случае для цифровой вычислительной машины дополнительно необходимы аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи. Эти устройства выгодно применять лишь тогда, когда требования к точности вычислений настолько высоки, что не могут быть обеспечены аналоговыми вычислительными схемами. Существующие аналоговые вычислители позволяют получать точность не более 0,1%.

В дальнейшем рассматривается работа важнейших аналоговых вычислительных схем, выполненных на основе традиционных VV-операционных усилителей, осуществляющих четыре основные арифметические операции, операции дифференцирования и интегрирования, а также формирования трансцендентных и произвольных функций. Вместе с тем ставится задача по возможности четко изложить принцип работы схем. Для этого в начальных главах мы прежде всего исходим из предположения, что используемые операционные усилители имеют идеальные свойства. А ограничения и проблемы, вызванные с применением в схемах реальных операционных усилителей, подробно обсуждались в главе 5. Аналогичные соображения относятся также и ко всем рассматриваемым в дальнейшем схемам. В этой главе мы обратим внимание на особенности, играющие важную роль в ряде схем.

11.1

Схема суммирования

Для суммирования нескольких напряжений используется операционный усилитель с инвертированием входного сигнала. Входные напряжения подаются через последовательно включенные резисторы на инвертирующий (N) вход при заземленном неинвертирующем (P) входе (рис. 11.1). Так как эта точка представляет собой эквивалент «земли», то непосредственное применение первого закона Кирхгофа приводит к следующему соотношению для выходного напряжения:

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} + \frac{U_a}{R_N} = 0.$$

Инвертирующий сумматор также может использоваться в качестве усилителя с большим диапазоном установки начального смещения, если на один из входов схемы подавать постоянное напряжение.

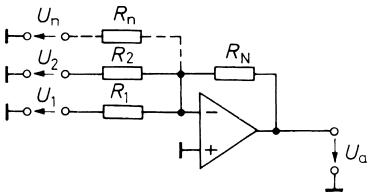


Рис. 11.1. Схема инвертирующего сумматора
Выходное напряжение:

$$-U_a = \frac{R_N}{R_1} U_1 + \frac{R_N}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_N}{R_n} U_n$$

11.2 Схемы вычитания

Вычитание сигналов можно свести к сложению с инвертированными входными сигналами.

11.2.1 Использование сложения

Вычитание можно свести к сложению с инвертированными вычитаемыми напряжениями. Схема, осуществляющая эту операцию, представлена на рис. 11.2. Операционный усилитель OV1 инвертирует входное напряжение U_2 . При этом на выходе схемы мы получаем:

$$U_a = A_p U_2 - A_N U_1. \tag{11.1}$$

Правильное образование разности, соответствующей значению $U_a = A_D(U_1 - U_2)$, получается, если оба коэффициента усиления A_p и A_N равны желаемому усилению разности A_D . Погрешность полученной разности характеризуется коэффициентом ослабления синфазного сигнала $G = A_D / A_{Cl}$. Для его оценки подставляем

$$U_2 = U_{Cl} + \frac{1}{2} U_D \text{ и } U_1 = U_{Cl} - \frac{1}{2} U_D \tag{11.2}$$

в уравнение (11.1) и получаем:

$$U_a = \underbrace{(A_p - A_N)}_{A_{Cl}} U_{Cl} + \underbrace{\frac{1}{2}(A_p + A_N)}_{A_D} U_D. \tag{11.3}$$

Здесь: U_{Cl} – синфазное напряжение, U_D – разность напряжений.

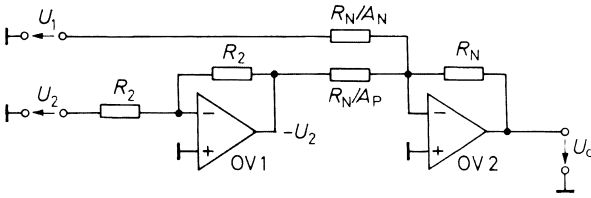


Рис. 11.2. Схема вычитания с помощью суммирующей схемы
 Выходное напряжение: $U_a = A_D(U_2 - U_1)$
 Соотношение коэффициентов усиления: $A_N = A_P = A_D$

Из уравнения (11.3) получаем коэффициент ослабления синфазного сигнала:

$$G = \frac{A_D}{A_{Cl}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{A_P + A_N}{A_P - A_N}. \tag{11.4}$$

Теперь предположим, что условия для коэффициентов усиления приблизительно выполнены. Следовательно, должны выполняться и условия:

$$A_N = A - \frac{1}{2} \Delta A,$$

$$A_P = A + \frac{1}{2} \Delta A.$$

Подставляя их в уравнение (11.4), в результате получаем:

$$G = \frac{A}{\Delta A}. \tag{11.5}$$

Следовательно, ослабление синфазного сигнала пропорционально обратной величине разности коэффициентов усиления обоих усилителей.

11.2.2 Схема вычитания на операционном усилителе

Для оценки выходного напряжения в соответствии с выражением (11.3) можно применить принцип суперпозиции. В результате получается:

$$U_a = k_1 U_1 + k_2 U_2.$$

При $U_2 = 0$ схема работает как инвертирующий усилитель с $U_a = -\alpha_N U_1$. Отсюда следует, что $k_1 = -\alpha_N$. При $U_1 = 0$ схема работает как электрометрический усилитель с потенциометром на входе. Напряжение

$$V_p = \frac{R_p}{R_p + \frac{R_p}{\alpha_p}} U_2$$

соответственно усиливается с коэффициентом усиления $(1 + \alpha_N)$. Следовательно, в этом случае получаем:

$$U_a = \frac{\alpha_p}{1 + \alpha_p}(1 + \alpha_N)U_2.$$

Если оба отношения сопротивлений равны, то есть $\alpha_N = \alpha_p = \alpha$, то

$$U_a = \alpha U_2,$$

и, следовательно, $k_2 = \alpha$. В соответствии с этим получается выходное напряжение:

$$U_a = \alpha(U_2 - U_1).$$

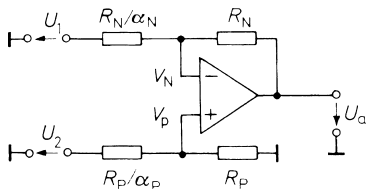


Рис. 11.3. Схема вычитания на операционном усилителе

Выходное напряжение: $U_a = \alpha(U_2 - U_1)$

Соотношение коэффициентов усиления: $\alpha_N = \alpha_p = \alpha$

Если соотношение сопротивлений резисторов на P- и N-входах не равно точному значению α , то схема формирует разность входных напряжений в соответствии с выражением:

$$U_a = \frac{1 + \alpha_N}{1 + \alpha_p} \alpha_p U_2 - \alpha_N U_1.$$

Для оценки ослабления синфазного сигнала снова используем выражение (11.2) и получим:

$$G = \frac{A_D}{A_{Cl}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 + \alpha_N)\alpha_p + (1 + \alpha_p)\alpha_N}{(1 + \alpha_N)\alpha_p - (1 + \alpha_p)\alpha_N}.$$

При приближенном выполнении условия для коэффициентов, то есть $\alpha_N = \alpha - 1/2 \Delta\alpha$ и $\alpha_p = \alpha + 1/2 \Delta\alpha$ следует пренебречь членами высшего порядка, в результате чего мы получим:

$$G \approx (1 + \alpha) \frac{\alpha}{\Delta\alpha}. \tag{11.6}$$

Следовательно, при постоянном значении α ослабление синфазного сигнала обратно пропорционально отношению разности сопротивлений. Если оба соотношения сопротивлений равны, то $G = \infty$. Однако это справедливо лишь для идеального операционного усилителя. Если желательно получить особо высокое ослабление синфазного сигнала, то можно незначительно изменять сопротивление R_p , устанавливая при этом такое $\Delta\alpha$, которое позволит компенсировать конечное ослабление синфазного сигнала реального операционного усилителя.

Кроме того, из выражения (11.6) следует, что при данном соотношении сопротивлений $\Delta\alpha/\alpha$ ослабление примерно пропорционально установленному при настройке разностному усилению $A_D = \alpha$. Это является решающим преимуществом данной схемы по сравнению с предыдущей.

Пояснить полученный результат позволяет следующий пример: два напряжения примерно по 10 В должны вычитаться. Их разность при этом не должна быть более 100 мВ. Это значение должно появиться на выходе усилителя увеличенным до 5 В с точностью не менее 1%. Разностное усиление должно составить $A_D = 50$. Абсолютная погрешность на выходе должна быть менее чем 1% от 5 В, то есть 50 мВ. Предположим, что в благоприятном случае задано синфазное усиление единственного источника ошибки. При этом получается следующее:

$$A_{cl} \leq \frac{50 \text{ мВ}}{10 \text{ В}} = 5 \cdot 10^{-3},$$

откуда следует, что

$$G \geq \frac{50}{5 \cdot 10^{-3}} = 10^4 \cong 80 \text{ дБ.}$$

Согласно выражению (11.6) это требование может выполняться схемой вычитания (рис. 11.3) с допуском $\Delta\alpha/\alpha = 0,5\%$. В схеме же, представленной на рис. 11.2, необходим разброс не более 0,01%.

На рис. 11.4 показана схема вычитания, расширенная до любого количества суммирующих и вычитающих входов. Условием правильного функционирования схемы является выполнение указанного ниже условия для коэффициентов.

$$U_a = \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i - \sum_{i=1}^m \alpha_i U_i$$

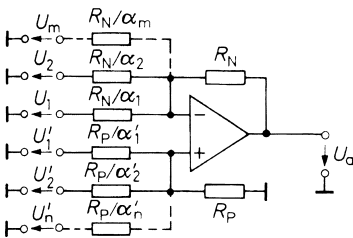


Рис. 11.4. Схема вычитания с любым количеством входов

Выходное напряжение:

Условие для коэффициентов: $\sum_{i=1}^n \alpha_i' = \sum_{i=1}^m \alpha_i$

Если при заданной величине коэффициентов это условие не выполнять, то при соответствующих коэффициентах возможно сложение или вычитание напряжений с нуля.

Для обобщения указанных ранее соотношений применяем закон Кирхгофа для точки, объединяющей N-входы:

$$\sum_{i=1}^m \frac{U_i - V_N}{\left(\frac{R_N}{\alpha_i}\right)} + \frac{U_a - V_N}{R_N} = 0.$$

Из этого следует, что

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i U_i - V_N \left[\sum_{i=1}^m \alpha_i + 1 \right] + U_a = 0.$$

Аналогично получаем выражение для точки, объединяющей Р-входы:

$$\sum_{i=1}^n \alpha'_i U'_i - V_P \left[\sum_{i=1}^n \alpha'_i + 1 \right] = 0.$$

При $V_N = V_P$ и при дополнительном условии

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i = \sum_{i=1}^n \alpha'_i. \tag{11.7}$$

из вычитания обоих уравнений получаем:

$$U_a = \sum_{i=1}^n \alpha'_i U'_i - \sum_{i=1}^m \alpha_i U_i.$$

При $n = m = 1$ многовходовая схема вычитания сводится к основной (см. рис. 11.3).

Во входных цепях рассмотренных схем присутствуют внутренние сопротивления источников сигналов. Чтобы они не приводили к ошибкам вычислений, их выходные сопротивления должны быть достаточно низкоомными. Если источники сигналов построены на операционных усилителях с отрицательной обратной связью, это условие в большинстве случаев хорошо выполняется. При других источниках сигналов чаще всего на входах необходимо включать преобразователь полного сопротивления в форме электрометрического усилителя. Получающаяся при этом схема называется электрометрическим вычитателем (инструментальным усилителем) и используется преимущественно в измерительной технике. Подробно она рассматривается в главе 20.

11.3

Схема с изменяемым модулем и знаком коэффициента усиления

Схема, приведенная на рис. 11.5, позволяет осуществлять умножение входного напряжения на постоянный коэффициент, значение которого устанавливается потенциометром R_2 в диапазоне $\pm n$. Если движок потенциометра установлен в крайнее правое по схеме положение, то $q = 0$ и схема работает как инвертирующий усилитель с коэффициентом усиления $A = -n$. Резистор $R_1 / (n - 1)$ в этом случае не оказывает влияния, так как на него не подается напряжение (потенциал инвертирующего входа равен нулю).

При $q = 1$ полное входное напряжение U_e падает на неинвертирующий вход. Вследствие этого падение напряжения на резисторе R_1 / n равно 0, и схема работает как неинвертирующий усилитель с коэффициентом усиления

$$A = 1 + \frac{R_1}{R_1 / (n - 1)} = +n.$$

Для промежуточных случаев усиление составляет:

$$A = n(2q - 1).$$