

Из предисловия к 11-му изданию

Элементы высокой степени интеграции все шире применяются в электронных устройствах. В аналоговой технике интегральные усилители почти всюду вытеснили своих предшественников, собранных из дискретных транзисторов. Подобная тенденция наблюдается также в высокочастотной и силовой полупроводниковой технике. Точно так же программируемые логические устройства (ПЛУ) входят в область цифровой техники, заменяя логические схемы на базе вентилях и триггеров. Элементы высокой степени интеграции позволяют сэкономить место, снизить расходы на комплектующие и оснастку и повысить надежность устройств.

В связи с этим происходит разделение конструкторских разработок на две области: создание устройств с использованием стандартных ИС (конструирование на уровне монтажной платы) и разработка собственно микросхем (конструирование на уровне транзисторов). Для правильного применения стандартных микросхем важно знать их внутреннее устройство, однако подробности на уровне транзисторов явно излишни. Напротив, конструктор интегральной схемы работает только на уровне транзисторов. Поэтому в настоящее время развитие схмотехники на транзисторном уровне равнозначно проектированию ИС. Однако есть важные различия между схмотехникой с применением микросхем и дискретных транзисторов. Самыми характерными особенностями являются масштабируемость транзисторов, установка рабочей точки по схеме токового зеркала, использование активных нагрузок вместо сопротивлений и непосредственная связь между отдельными каскадами. Названным вопросам посвящены новые главы об основах схмотехники.

Моделирование электронных схем приобретает все большее значение с развитием схмотехники. Оно жизненно важно при конструировании ИС и разработке конкретных устройств. В наши дни схему реализуют лишь тогда, когда правильность ее функционирования проверена путем компьютерного моделирования, причем центральная роль принадлежит здесь самой модели. При конструировании конкретных устройств создаются макромодели стандартных микросхем, поставляемых изготовителями в законченном виде. Макромодели должны достаточно хорошо воспроизводить поведение ИС, не касаясь их внутренней структуры.

При конструировании интегральных схем пользуются стандартными моделями диодов, биполярных и полевых транзисторов; особенности процессов изготовления учитываются параметрами модели, которые заменяют характеристики из спецификаций одиночных транзисторов. Модели диодов и транзисторов вместе с их параметрами описываются в главах об основах схмотехники, однако мы ограничимся феноменологическим описанием, отказываясь углубляться в фундаментальные вопросы физики полупроводников.

Главы с основными сведениями о диодах, биполярных и полевых транзисторах состоят из четырех частей. В первой части вопросы излагаются столь же просто, как и в предыдущих изданиях. Вторая часть посвящена внутреннему устройству. Модели

и их параметры обсуждаются в третьей части. Четвертая часть посвящена принципиальным схемам.

В главе об усилителях представлены важнейшие принципиальные схемы интегральной схемотехники, в том числе токовое зеркало, каскодные схемы, дифференциальные усилители, преобразователи внутреннего сопротивления и эталонные источники тока для установки рабочей точки. Главу завершает раздел об общих свойствах и параметрах усилителей.

В главе, посвященной операционным усилителям, показано, что существует не один, а четыре типа ОУ, и говорится об их наиболее эффективных применениях. При расчете схем операционные усилители описываются простой моделью.

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 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
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.

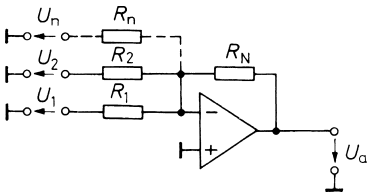


Рис. 11.1. Схема инвертирующего сумматора
Выходное напряжение:

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

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.

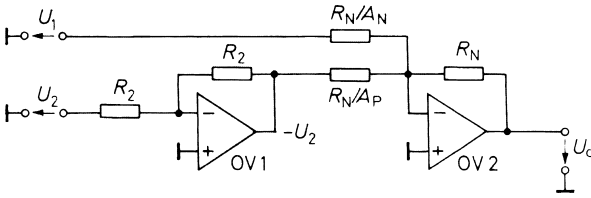


Рис. 11.2. Схема вычитания с помощью суммирующей схемы
 Выходное напряжение: $U_a = A_D(U_2 - U_1)$
 Соотношение коэффициентов усиления: $A_N = A_P = A_D$

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:

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

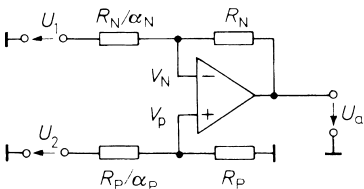


Рис. 11.3. Схема вычитания на операционном усилителе

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.

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

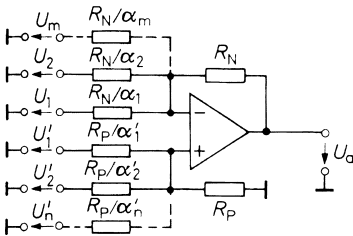


Рис. 11.4. Схема вычитания с любым количеством входов

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 попадает 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:

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