

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	9
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	11
<b>Глава 1. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ</b> .....	13
1.1. Общие сведения .....	13
1.2. Идеальный операционный усилитель.....	15
1.3. Основные схемы включения операционного усилителя.....	16
1.3.1. Дифференциальное включение.....	16
1.3.2. Инвертирующее включение .....	17
1.3.3. Неинвертирующее включение .....	18
1.4. Внутренняя схемотехника операционных усилителей.....	19
1.4.1. Требования к ОУ.....	19
1.4.2. Блок-схема операционного усилителя .....	20
1.4.3. Стандартная схема операционного усилителя .....	23
1.5. Схема замещения операционного усилителя .....	24
1.5.1. Входное сопротивление схемы.....	25
1.5.2. Выходное сопротивление схемы .....	25
1.6. Коррекция частотной характеристики.....	26
1.6.1. Частотные характеристики ОУ.....	27
1.6.2. Полная частотная коррекция .....	29
1.6.3. Внешняя частотная коррекция .....	32
1.6.4. Скорость нарастания .....	33
1.6.5. Компенсация емкостной нагрузки .....	34
1.7. Параметры операционных усилителей .....	35
1.7.1. Точностные параметры.....	35
1.7.2. Динамические параметры ОУ .....	46
1.7.3. Параметры, характеризующие усиление сигналов переменного тока .....	47
1.7.4. Эксплуатационные параметры ОУ.....	48
1.8. Типы операционных усилителей.....	49
1.9. Улучшение параметров операционных усилителей .....	53
1.9.1. Снижение напряжения смещения нуля.....	53
1.9.2. Повышение устойчивости ОУ.....	55
1.9.3. Снижение токов утечки .....	56
1.9.4. Защита операционных усилителей .....	57
1.9.5. Повышение выходного тока ОУ.....	59
1.9.6. Повышение выходного напряжения ОУ.....	60
1.9.7. Повышение быстродействия ОУ.....	62
1.9.7. Снижение шума ОУ .....	64
1.9.8. Экспериментальное определение параметров ОУ .....	65

1.10. Однополярное питание операционных усилителей.....	67
1.10.1. Общие сведения.....	67
1.10.2. Смещение ОУ с однополярным питанием.....	68
1.10.3. Введение искусственной нулевой точки.....	70
1.10.4. Расширение динамического диапазона.....	71
<b>Глава 2. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ.....</b>	<b>77</b>
2.1. Линейные аналоговые вычислительные схемы на ОУ.....	77
2.1.1. Схема масштабирования.....	77
2.1.2. Схема суммирования.....	78
2.1.3. Схема интегрирования.....	79
2.1.4. Схема дифференцирования.....	81
2.2. Схемы линейного преобразования сигналов.....	83
2.2.1. Источники напряжения, управляемые током.....	83
2.2.2. Источники тока, управляемые напряжением.....	84
2.2.3. Инверторы сопротивления.....	90
2.2.4. Гираторы.....	91
2.3. Активные электрические фильтры на ОУ.....	95
2.3.1. Основные понятия.....	95
2.3.2. Фильтры нижних частот.....	96
2.3.3. Фильтры верхних частот.....	99
2.3.4. Полосовые фильтры.....	100
2.3.5. Полосно-подавляющие фильтры.....	101
2.3.6. Реализация фильтров на операционных усилителях.....	102
2.3.7. Реализация активных фильтров на основе метода переменных состояния.....	108
2.3.8. Фазовые фильтры.....	111
2.4. Измерительные усилители.....	114
2.4.1. Измерительный усилитель на одном ОУ.....	115
2.4.2. Измерительный усилитель на двух ОУ.....	118
2.4.3. Измерительный усилитель на трех ОУ.....	118
2.4.4. Применение измерительных усилителей.....	121
2.5. Схемы нелинейного преобразования сигналов на ОУ.....	123
2.5.1. Логарифмирующие и экспоненциальные преобразователи.....	123
2.5.2. Прецизионные выпрямители на ОУ.....	126
2.6. Генераторы сигналов на ОУ.....	131
2.6.1. Релаксационные генераторы.....	131
2.6.2. Генераторы синусоидальных колебаний.....	135
2.7. Аналоговые множители.....	138
2.7.1. Множитель с управляемым сопротивлением канала полевого транзистора.....	138
2.7.2. Множители на основе управляемых источников тока.....	138
2.8. Измерительные схемы на ОУ.....	141
2.8.1. Измерение заряда.....	141
2.8.2. Измерители амплитуды (пиковые детекторы).....	143
2.8.3. Фотоэлектрические измерения.....	145
2.8.4. Мостовые измерительные схемы.....	147
2.8.5. Измерение температуры.....	150
2.8.6. Измерение действующего значения.....	152
<b>Глава 3. СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ УСИЛИТЕЛИ НА БАЗЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОУ.....</b>	<b>160</b>
3.1. Широкополосные усилители.....	160
3.1.1. Работа транзисторного усилительного каскада на высоких частотах.....	161
3.1.2. Применение операционных усилителей для усиления радиочастотных сигналов.....	163
3.1.3. Широкополосные ОУ с обратной связью по току.....	164
3.1.4. Усилители дифференциальных линий.....	170
3.2. Изолирующие усилители.....	174
3.3. Усилители класса D.....	178
3.3.1. Общие сведения.....	178

3.3.2. Виды широтно-импульсной модуляции .....	178
3.3.3. Схемотехника выходных каскадов усилителей класса D .....	180
3.3.4. Промышленные типы усилителей класса D .....	182
3.3.5. Помехи, порождаемые усилителями класса D и борьба с ними .....	183
<b>Глава 4. АНАЛОГОВЫЕ КОМПАРАТОРЫ И ТАЙМЕРЫ .....</b>	<b>187</b>
4.1. Общие сведения о компараторах .....	187
4.2. Аналоговый интегральный компаратор .....	189
4.2.1. Принципы построения интегральных компараторов .....	189
4.2.2. Компараторы с однополярным питанием .....	191
4.2.3. Скоростные компараторы .....	192
4.3. Применение компараторов .....	194
4.3.1. Двухпороговый компаратор .....	194
4.3.2. Детектор пересечения нуля .....	195
4.3.3. Сравнение напряжений противоположной полярности .....	195
4.3.4. Мультивибраторы .....	196
4.3.5. Применение компаратора в качестве ОУ .....	198
4.3.6. Генератор, управляемый напряжением .....	199
4.3.7. Логические элементы .....	201
4.3.8. Одновибраторы .....	203
4.3.9. Генератор временных задержек .....	206
4.3.10. Широтно-импульсный модулятор .....	207
4.3.11. Двухполупериодный выпрямитель .....	208
4.4. Параметры компараторов .....	209
4.5. Аналоговые таймеры .....	210
4.5.1. Таймер NE555 .....	210
4.5.2. Основные схемы включения таймера .....	212
4.5.3. Типы интегральных таймеров .....	214
<b>Глава 5. ЛИНЕЙНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>217</b>
5.1. Общие сведения .....	217
5.2. Схемотехника линейных стабилизаторов напряжения .....	217
5.2.1. Базовая схема линейного стабилизатора напряжения .....	218
5.2.2. Интегральный линейный стабилизатор напряжения .....	219
5.2.3. Стабилизация отрицательных напряжений .....	221
5.2.4. Уменьшение потерь в стабилизаторах .....	222
5.3. Устойчивость линейных стабилизаторов напряжения .....	224
5.3.1. Устойчивость $n-p-n$ -стабилизаторов .....	224
5.3.2. Устойчивость МПН-стабилизаторов .....	225
5.4. Основные параметры линейных стабилизаторов напряжения .....	228
5.4.1. Точностные параметры .....	228
5.4.2. Динамические параметры .....	229
5.4.3. Эксплуатационные параметры .....	231
5.5. Схемы включения линейных стабилизаторов напряжения .....	232
5.5.1. Типовое включение .....	232
5.5.2. Увеличение выходного напряжения .....	232
5.5.3. Повышение максимального выходного тока .....	233
5.5.4. Стабилизация тока .....	234
5.5.5. Источник двухполярного напряжения .....	234
5.5.6. Стабилизатор переменного напряжения .....	235
5.5.7. Эмиттерный повторитель с максимальной передачей тока в нагрузку .....	236
5.5.8. Получение искусственной общей точки .....	236
5.6. Источники опорного напряжения .....	237
5.6.1. ИОН на стабилитронах .....	237
5.6.2. ИОН на напряжении запрещенной зоны .....	239
5.6.3. ИОН на полевых транзисторах .....	244
5.6.4. Устойчивость ИОН .....	245

5.6.5. Параметры источников опорного напряжения .....	247
5.6.6. Применение ИОН .....	253
<b>Глава 6. ИМПУЛЬСНЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>260</b>
6.1. Общие сведения .....	260
6.2. Понижающий импульсный стабилизатор .....	262
6.2.1. Схема понижающего импульсного стабилизатора напряжения .....	262
6.2.2. Электромагнитные процессы в понижающем ИСН .....	263
6.2.3. Понижающие ИСН с синхронными выпрямителями .....	267
6.2.4. Многофазные ИСН .....	268
6.3. Повышающий импульсный стабилизатор .....	271
6.4. Инвертирующий импульсный стабилизатор .....	273
6.5. Составные схемы ИСН .....	275
6.5.1. Схема Кука .....	275
6.5.2. Несимметричный преобразователь первичной индуктивности .....	277
6.6. Инверторные схемы .....	280
6.6.1. Общие сведения .....	280
6.6.2. Нерегулируемые инверторы .....	281
6.6.3. Регулируемые инверторы .....	284
6.6.4. Однотактные инверторы .....	288
6.6.5. Резонансные инверторы .....	295
6.7. Сетевые источники питания .....	303
6.7.1. Общие сведения .....	303
6.7.2. Импульсные сетевые источники на базе обратногоходового преобразователя .....	304
6.7.3. Организация обратной связи по выходному напряжению в сетевых источниках .....	308
6.8. Импульсные источники на коммутируемых конденсаторах .....	313
6.9. Корректоры коэффициента мощности .....	318
6.9.1. Общие положения .....	318
6.9.2. Алгоритмы формирования кривой входного тока .....	319
6.9.3. Контроллеры ККМ для сетей с широким диапазоном напряжений .....	323
6.10. Драйверы .....	325
6.10.1. Общие сведения .....	325
6.10.2. Схемы драйверов биполярных транзисторов .....	326
6.10.3. Драйверы МОП- и IGBT-транзисторов .....	327
6.10.4. Микросхемы драйверов МОП- и IGBT-транзисторов .....	329
6.11. Устойчивость импульсных стабилизаторов напряжения .....	333
6.11.1. Общие сведения .....	333
6.11.2. Устойчивость импульсных стабилизаторов с обратной связью по напряжению .....	333
6.11.3. Устойчивость импульсных стабилизаторов с дополнительной обратной связью по току дросселя .....	336
6.11.4. Особенности анализа устойчивости ИСН с силовыми трансформаторами .....	344
<b>Глава 7. АНАЛОГОВЫЕ КОММУТАТОРЫ .....</b>	<b>349</b>
7.1. Общие сведения .....	349
7.2. Электронные коммутаторы .....	350
7.3. Коммутаторы на полевых транзисторах .....	350
7.4. Промышленные аналоговые коммутаторы .....	353
7.4.1. Простейшие коммутаторы .....	353
7.4.2. Аналоговые мультиплексоры .....	355
7.4.3. Матричные коммутаторы .....	358
7.4.4. Оптореле .....	360
7.5. Характеристики аналоговых коммутаторов .....	362
7.5.1. Статические характеристики .....	362
7.5.2. Динамические характеристики .....	364
7.5.3. Эксплуатационные параметры .....	368
7.6. Применение аналоговых коммутаторов .....	369
7.6.1. Влияние нелинейности аналоговых коммутаторов на искажения передаваемых сигналов .....	369

7.6.2. Защита коммутаторов от перенапряжений.....	371
7.7. Устройства выборки-хранения.....	372
7.7.1. Схемы устройств выборки-хранения.....	372
7.7.2. Основные характеристики УВХ.....	375
7.7.3. Применение УВХ.....	380
7.8. Устройства на переключаемых конденсаторах.....	382
<b>Глава 8. ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....</b>	<b>387</b>
8.1. Общие сведения.....	387
8.2. Параллельные ЦАП.....	388
8.2.1. ЦАП с суммированием весовых токов.....	388
8.2.2. Параллельный ЦАП на переключаемых конденсаторах (ЦАП с суммированием зарядов).....	400
8.2.3. ЦАП с суммированием напряжений.....	401
8.3. Последовательные ЦАП.....	403
8.3.1. ЦАП с широтно-импульсной модуляцией.....	403
8.3.2. Последовательный ЦАП на переключаемых конденсаторах.....	404
8.3.3. Сигма-дельта-ЦАП.....	405
8.4. Интерфейсы цифроаналоговых преобразователей.....	410
8.4.1. ЦАП с последовательным интерфейсом.....	411
8.4.2. ЦАП с параллельным интерфейсом.....	412
8.5. Применение ЦАП.....	414
8.5.1. Обработка чисел со знаком.....	414
8.5.2. Перемножители и делители аналоговых сигналов.....	416
8.5.3. Атенюаторы и интеграторы на ЦАП.....	418
8.5.4. Системы прямого синтеза сигналов.....	419
8.6. Параметры ЦАП.....	423
8.6.1. Статические параметры.....	424
8.6.2. Точность воспроизведения сигналов переменного тока.....	425
8.6.3. Динамические параметры.....	426
8.6.4. Шумы ЦАП.....	427
<b>Глава 9. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.....</b>	<b>431</b>
9.1. Общие сведения.....	431
9.1.1. Процедура аналого-цифрового преобразования.....	431
9.1.2. Апертурная погрешность.....	432
9.1.3. Шум квантования.....	434
9.1.4. Классификация АЦП.....	435
9.2. Параллельные АЦП.....	436
9.3. Последовательно-параллельные АЦП.....	438
9.3.1. Многоступенчатые АЦП.....	438
9.3.2. Конвейерные АЦП.....	439
9.3.3. Многотактные последовательно-параллельные АЦП.....	441
9.4. Последовательные АЦП.....	442
9.4.1. АЦП последовательного счета.....	442
9.4.2. АЦП последовательного приближения.....	444
9.5. Интегрирующие АЦП.....	446
9.5.1. АЦП многотактного интегрирования.....	446
9.5.2. Сигма-дельта АЦП.....	450
9.5.3. Преобразователи напряжение—частота.....	458
9.6. Интерфейсы АЦП.....	460
9.6.1. Общие сведения.....	460
9.6.2. АЦП с параллельным интерфейсом выходных данных.....	461
9.6.3. АЦП с последовательным интерфейсом выходных данных.....	462
9.6.4. Последовательный интерфейс сигма-дельта АЦП с процессорами.....	463
9.7. Параметры АЦП.....	464
9.7.1. Статические параметры.....	465
9.7.2. Динамические параметры.....	467

9.7.3. Шумы АЦП.....	467
9.7.4. Параметры, характеризующие качество преобразования сигналов переменного тока .....	468
9.8. Применение АЦП .....	471
9.8.1. Системы сбора данных.....	471
9.8.2. Кодеки .....	474
9.8.3. Измерение энергии .....	475
9.8.4. Управление двигателями переменного тока .....	477
<b>Глава 10. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ.....</b>	<b>484</b>
10.1. Датчики температуры .....	484
10.1.1. Интегральные датчики температуры на биполярных транзисторах .....	484
10.1.2. Датчики температуры с цифровым выходом.....	491
10.1.3. Температурные компараторы .....	495
10.1.4. Точность датчиков температуры.....	496
10.2. Датчики ускорения (акселерометры).....	498
10.2.1. Общие сведения.....	498
10.2.2. Пленочные пьезоэлектрические акселерометры .....	499
10.2.3. Объемные интегральные акселерометры .....	499
10.2.4. Поверхностные интегральные акселерометры .....	500
10.2.5. Точность интегральных акселерометров .....	507
10.3. Датчики давления .....	510
10.3.1. Устройство датчиков давления .....	510
10.3.2. Точность датчиков давления.....	514
10.4. Датчики влажности (гигрометры) .....	516
10.5. Датчики магнитного поля.....	518
10.5.1. Принцип действия датчика Холла .....	518
10.5.2. Интегральные датчики Холла .....	520
10.5.3. Применение датчиков Холла .....	522
10.5.4. Основные характеристики датчиков Холла .....	525

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Полупроводниковая электроника представляет собой одну из наиболее динамично развивающихся областей техники. Для современной электроники более, чем для чего бы то ни было иного, справедливы слова Черной Королевы из «Алисы в Зазеркалье» Льюиса Кэрролла: «...здесь, знаешь ли, приходится бежать со всех ног, чтобы только остаться на том же месте. Если же хочешь попасть в другое место, тогда нужно бежать, по крайней мере, вдвое быстрее!» В то же время по причине, неизвестной автору, объемы вузовских курсов по электронике и схемотехнике постоянно сокращаются. Многолетний опыт автора в преподавании курсов электроники и схемотехники студентам вузов, а также руководство дипломным проектированием и научной работой аспирантов показывают, что при неплохом знании основ цифровой электроники большинство выпускников вузов не готово к самостоятельной разработке аналоговых устройств. Американские специалисты в области аналоговой техники считают, что, для того чтобы выпускники вузов, решившие специализироваться в области аналоговой техники, «...действительно могли принять на свои плечи настоящую нагрузку, требуется от 5 до 10 лет...», в то время как «...этот уровень в области цифровых схем может быть достигнут за год...» (Электроника. 1993. № 11/12. с. 38). Выход один — молодым инженерам следует осваивать современную аналоговую схемотехнику самостоятельно, и в этом им могут помочь советы опытных специалистов, а также (и прежде всего) — книги.

Из литературы по схемотехнике, изданной на русском языке, наиболее значительными представляются «Полупроводниковая схемотехника» У. Титце и К. Шенка, 1982 г. и трехтомник «Искусство схемотехники» П. Хоровица и У. Хилла, 1993 г. В этих замечательных книгах сделана попытка объять необъятное: изложить всю современную электронику, включая дискретные полупроводниковые приборы, цифровые и СВЧ-устройства. Как следствие некоторые важные вопросы, такие, как интерфейсы аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей, динамика и устойчивость линейных и импульсных стабилизаторов напряжения и некоторые другие оказались практически незатронутыми. Кроме того, с момента написания этих книг прошло уже более 10 лет и за это время не только кардинально улучшились параметры уже известных типов интегральных микросхем, но и появились новые виды, такие как интегральные акселерометры и другие интегральные датчики, измерители энергии,

хFET-источники опорного напряжения, микросхемы прямого цифрового синтеза, конвейерные и сигма-дельта АЦП, усилители мощности класса D и др.

Предлагаемая читателю книга освещает ограниченную, но очень важную область полупроводниковой схемотехники: принципы построения, свойства, схемотехнику и особенности применения аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем (ИМС). В этой книге не рассматриваются технологии производства микросхем, почти не уделено внимания конструкции интегральных транзисторов, диодов, резисторов и других элементов — читатель может получить эти сведения в специальной литературе. Внутренняя схемотехника ИМС рассмотрена достаточно упрощенно.

Для того чтобы создать у читателя хотя бы самое общее представление о возможностях современных аналоговых и аналого-цифровых микросхем, в книге приведены наиболее важные параметры ряда современных промышленных типов ИМС.

При написании этой книги автор попытался осветить, наряду с чисто техническими вопросами, и основные исторические вехи в развитии аналоговой интегральной схемотехники, отметить наиболее яркие творческие успехи ее разработчиков. Все принципы построения микросхем, а также схем их применения, несомненно, являются продуктами творчества. Именно это обстоятельство и позволяет (конечно, с определенными оговорками) назвать аналоговую схемотехнику искусством. К этому можно добавить, что по количеству патентов аналоговая схемотехника многократно превосходит цифровую. А патент — это продукт творчества, не в меньшей степени, чем произведение искусства.

Автор предполагает, что читатели уже изучили основы электротехники и электроники и, в том числе, пусть на элементарном уровне, цифровую технику и начала теории автоматического управления. По цифровой технике можно рекомендовать, помимо уже упоминавшихся книг, прекрасно написанный учебник «Цифровая схемотехника» профессора Е.П. Угрюмова и «Основы цифровой электроники» Р. Токхейма. По теории автоматического управления различных по объему и научному уровню учебников очень много. Например, основные сведения содержит компактный учебник «Основы теории и элементы систем автоматического регулирования» В.В. Солодовникова, В.Н. Плотникова и А.В. Яковлева.

Автор выражает благодарность всем коллегам, принявшим участие в обсуждении материалов этой книги, и в особенности дочери Татьяне, взявшей на себя большой труд по технической подготовке текста и рисунков.



# ВВЕДЕНИЕ

Аналоговые устройства обработки сигналов продолжают занимать важное место в промышленной электронике. Это объясняется тем, что большинство типов первичных преобразователей физических величин — датчики температуры, давления и пр. — являются источниками аналоговых сигналов, а многие исполнительные элементы в объектах управления — электродвигатели, электромагниты и т.п. — управляются непрерывно изменяющимся электрическим током. Сложные системы управления, основой которых являются цифровые вычислительные комплексы, сопрягаются с объектами управления и датчиками с помощью аналоговых и аналого-цифровых устройств. Все это стимулирует ежегодное появление в мире многих десятков новых моделей аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем (ИМС). С точки зрения технологии изготовления ИМС делятся на полупроводниковые (монокристаллические, твердотельные) — изготавливаемые целиком на одной пластине кремния и гибридные — у которых резисторы, конденсаторы и соединительные проводники изготавливаются методами пленочной технологии, а бескорпусные активные элементы в виде чипов приклеиваются на пассивную часть схемы. Гибридные ИМС дороги, менее надежны и применяются обычно в тех случаях, когда отсутствуют монокристаллические ИМС с необходимыми параметрами. Поэтому большинство современных моделей ИМС монокристаллические.

История интегральных микросхем началась 12 сентября 1958 г., когда в лаборатории фирмы Texas Instruments Джеком Килби (Jack S. Kilby) был продемонстрирован генератор сигналов, изготовленный им на кусочке германия размером 11×1.5 мм. Прологом этого события явилось изобретение Джином Хорни (основателем фирмы Fairchild Semiconductor) планарного транзистора. В 2000 г. Дж. Килби за изобретение интегральной схемы был удостоен совместно с российским физиком Ж. И. Алферовым Нобелевской премии по физике. Появление интегральной микросхемы было вызвано стремлением снизить стоимость и повысить надежность электронных устройств за счет параллельного изготовления в едином технологическом процессе как активных элементов (транзисторов и диодов), так и пассивных (резисторов и конденсаторов). Впоследствии оказалось, что совместное изготовление транзисторов позволило лучше согласовать их характеристики, а это очень важно, например, для входных каскадов операционных усилителей. Расположение транзисторов в непосредственном

тепловом контакте друг с другом обеспечило повышение температурной стабильности аналоговых схем, а микроскопические размеры и близость элементов друг к другу — повышение их быстродействия.

Парадоксально, но в 1958 г. даже в США промышленность оказалась не готова к восприятию интегральных микросхем, несмотря на то, что проблемы, связанные с увеличением числа компонентов в одном изделии, уже тогда стояли очень остро. Всерьез тогда ими заинтересовались только военные. Только после того, как при участии все того же Дж. Килби был изготовлен первый микрокалькулятор, началось бурное развитие микросхемотехники и технологии ее реализации. Промежуточные (далеко еще не окончательные) итоги этого развития мы можем наблюдать сейчас. Если в 1958 г. одиночный транзистор с посредственными, по нынешним понятиям, характеристиками стоил \$10, то сегодня за те же деньги можно приобрести модуль памяти, содержащий несколько сотен миллионов транзисторов.

Во многом благодаря развитию интегральных схем, мировой рынок электроники вырос с \$29 млрд. в 1961 г. до \$1150 млрд. в 2000 г., причем доля собственно микросхем составила в 2000 г. \$177 млрд. Несмотря на доминирование на рынке цифровых электронных компонентов, процентная доля аналоговых устройств с 1970 г. все время остается на одном и том же уровне — примерно 20...25%. Все это позволяет считать, что квалифицированные специалисты по аналоговой схемотехнике будут востребованы еще многие годы.

# Глава 1

## ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

### 1.1. Общие сведения

Операционный усилитель (ОУ) был создан для выполнения математических операций в аналоговых вычислительных машинах. Первый ламповый ОУ K2W был разработан в 1942 году Л. Джули (США). Он содержал два двойных электровакуумных триода. Первые ОУ представляли собой громоздкие и дорогие устройства. С заменой ламп транзисторами операционные усилители стали меньше, дешевле, надежнее и сфера их применения расширилась. Первые операционные усилители на транзисторах появились в продаже в 1959 году. Р. Малтер (США) разработал ОУ P2, включавший семь германиевых транзисторов и варикапный мостик. Требования к увеличению надежности, улучшению характеристик, снижению стоимости и размеров способствовали развитию интегральных микросхем. Первый интегральный ОУ  $\mu$ A702 (отечественный аналог — 140УД1), имевший рыночный успех, был разработан Робертом Видларом (R.J. Widlar) в 1963 году. Этот усилитель имел низкий коэффициент усиления, большие входные токи и несимметричный выход (разное выходное сопротивление для положительной и отрицательной полуволн выходного сигнала). Через два года Р. Видлар разработал усилитель  $\mu$ A709 [1.1, 1.2], трехкаскадный с большим коэффициентом усиления и симметричным выходом, но сложной схемой коррекции частотной характеристики (отечественный аналог — 153УД1). Усилитель  $\mu$ A709 нашел широкое распространение в массовой аналоговой аппаратуре обработки данных. Ежегодный мировой выпуск этой ИМС оценивался в 1970 г. на уровне 20...30 млн. шт. Решениями, примененными в этом ОУ, была в значительной мере подготовлена схемотехническая база для следующих поколений операционных усилителей.

В 1967—1968 годах Р. Видлар разработал двухкаскадный LM101 [1.3] и его усовершенствованный вариант LM101A (отечественные аналоги соответственно 153УД2 и 153УД6). Эти усилители явились настоящим прорывом в аналоговой интегральной схемотехнике. Для них характерны простая схема частотной коррекции (всего один конденсатор), высокий коэффициент усиления (до 150000) и малые входные токи (особенно у LM101A). Усилители LM101 и LM101A в отличие от  $\mu$ A709 не требовали внешних цепей защиты входа и выхода, что весьма упрощало их применение. Р. Видлар вышел за рамки привычных представлений о транзисторе как о трехэлектродном приборе. В его новых разработках транзисторы имели по несколько коллекторов и эмиттеров, поэтому принципиальные схемы ОУ стали значительно отличаться от традиционных.

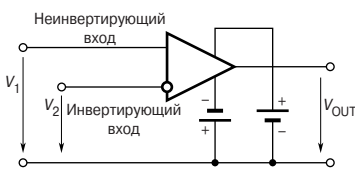
В настоящее время номенклатура ОУ насчитывает сотни наименований. Операционные усилители выпускаются в малогабаритных корпусах и очень дешевы, что способствует их массовому распространению.



Операционные усилители представляют собой усилители постоянного тока с высоким коэффициентом усиления, дифференциальным входом и малыми значениями напряжения смещения нуля и входных токов.

По размерам и цене ОУ общего применения практически не отличаются от отдельного транзистора. В то же время преобразование сигнала схемой на ОУ почти исключительно определяется свойствами цепей внешних обратных связей и отличается высокой стабильностью и воспроизводимостью. Кроме того, благодаря практически идеальным характеристикам ОУ реализация различных функциональных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на дискретных транзисторах. Поэтому операционные усилители стали сегодня основной элементной базой (своего рода «кирпичиками») во многих областях аналоговой схемотехники.

На **Рис. 1.1** дано схемное обозначение операционного усилителя.



**Рис. 1.1.** Обозначение ОУ

Входной каскад выполняется в виде дифференциального усилителя, так что в целом ОУ имеет два входа — инвертирующий и неинвертирующий. В дальнейшем будем, при необходимости, обозначать неинвертирующий вход знаком «+» или буквой «*p*» (positive — положительный), а инвертирующий — знаком «-» или буквой «*n*» (negative — отрицательный). На схе-

мах инвертирующий вход дополнительно обозначается кружком. Выходное напряжение  $V_{OUT}$  находится в одной фазе с разностью входных напряжений, причем для сохранения знака при вычислении этой разности принято вычитать напряжение на инвертирующем входе из напряжения на неинвертирующем:

$$V_{OUT} = K_V(V_p - V_n),$$

где  $K_V$  — дифференциальный коэффициент усиления ОУ.



Разность входных напряжений  $V_D = V_p - V_n$  называется *дифференциальным* входным напряжением. Полусумма входных напряжений  $V_C = (V_p + V_n)/2$  называется *синфазным* входным напряжением. Иногда синфазным называют также напряжение на неинвертирующем входе.

Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, следует использовать двухполярное напряжение питания. Для этого нужно предусмотреть два источника постоянного напряжения, которые, как это показано на **Рис. 1.1**, подключаются к соответствующим внешним выводам ОУ. Чаще всего интегральные операционные усилители рассчитаны на напряжение питания  $\pm 15$  В, хотя существует немало моделей, которые питаются от источников как существ-

венно большего, так и заметно меньшего напряжения. В дальнейшем, рассматривая схемы на ОУ, мы, как правило, не будем указывать выводы питания.

Наконец, очень важное обстоятельство: операционный усилитель почти всегда охвачен глубокой *отрицательной обратной связью*, свойства которой и определяют свойства схемы с ОУ.

Принцип введения отрицательной обратной связи иллюстрируется **Рис. 1.2**.

Выход усилителя через цепь обратной связи с коэффициентом передачи  $\beta$  ( $|\beta| \leq 1$ ) связан с его входом. Для случая, показанного на **Рис. 1.2**, когда напряжение, полученное на выходе цепи обратной связи, вычитается из входного напряжения (отрицательная обратная связь) легко составить очевидное уравнение

$$V_{\text{OUT}} = K_V V_D = K_V (V_{\text{IN}} - \beta V_{\text{OUT}}).$$

Разрешив это уравнение относительно  $V_{\text{OUT}}$ , получим выражение для коэффициента усиления схемы с обратной связью:

$$K = V_{\text{OUT}} / V_{\text{IN}} = K_V / (1 + \beta K_V). \quad (1.1)$$

Произведение  $\beta K_V$  носит название петлевого коэффициента усиления.

На практике  $K_V \gg 1$  (десятки и сотни тысяч), а значение  $\beta$  лежит в пределах 0.01...1. Тогда  $\beta K_V \gg 1$  и коэффициент усиления ОУ, охваченного обратной связью) составит

$$K \approx 1/\beta. \quad (1.2)$$

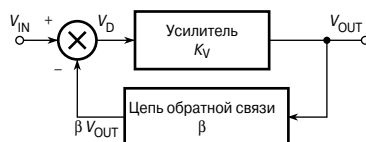
Из этого соотношения следует, что коэффициент усиления схемы с отрицательной обратной связью в основном определяется свойствами внешней цепи обратной связи и практически не зависит от параметров самого усилителя. В простейшем случае цепь обратной связи представляет собой резистивный делитель напряжения. При этом схема с ОУ работает как линейный усилитель, коэффициент усиления которого определяется только коэффициентом ослабления цепи обратной связи. Если в качестве цепи обратной связи применяется *RC*-цепь, то образуется активный фильтр. Наконец, включение в цепь обратной связи ОУ диодов и транзисторов позволяет реализовать с высокой точностью нелинейные преобразования сигналов.

## 1.2. Идеальный операционный усилитель

Для уяснения принципов действия схем на ОУ и упрощения их анализа оказывается полезным ввести понятие *идеального операционного усилителя*. Будем называть операционный усилитель идеальным, если он имеет следующие свойства:

а) бесконечно большой дифференциальный коэффициент усиления по напряжению  $K_V = \Delta V_{\text{OUT}} / \Delta (V_p - V_n)$  (у реальных ОУ  $K_V$  лежит в пределах  $10^3 \dots 30 \cdot 10^6$ );

б) нулевое напряжение смещения нуля  $V_{\text{OFF}}$ , т. е. при равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю независимо от синфазного вход-



**Рис. 1.2.** Принцип отрицательной обратной связи

ного напряжения (у реальных ОУ  $V_{OFF}$ , приведенное к входу, находится в пределах (1 мкВ ... 50 мВ);

в) нулевые входные токи по обоим входам (у реальных ОУ они лежат в пределах от сотых долей пА до единиц нкА);

г) нулевое выходное сопротивление (у реальных маломощных ОУ от десятков Ом до единиц кОм);

д) коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю;

е) мгновенный отклик на изменение входных сигналов (у реальных ОУ время установления выходного напряжения лежит в пределах от единиц нс до сотен мкс).

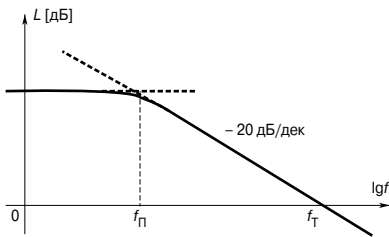


Рис. 1.3. Типичная ЛАЧХ операционного усилителя

Как будет показано в п. 1.6, операционный усилитель, предназначенный для универсального применения, из соображений устойчивости должен иметь такую же частотную характеристику, что и фильтр нижних частот первого порядка (инерционное звено), причем это требование должно удовлетворяться, по крайней мере, вплоть до частоты единичного усиления  $f_T$ , т. е. частоты, при которой  $|K_V| = 1$ . На Рис. 1.3 представлена типичная логарифмическая амплитудно-

частотная характеристика (ЛАЧХ) скорректированного операционного усилителя.

В комплексной форме дифференциальный коэффициент усиления такого усилителя выражается формулой:

$$\dot{K}_V = \frac{K_V}{1 + j(f/f_{\Pi})}.$$

Здесь  $K_V$  — дифференциальный коэффициент усиления ОУ по постоянному току, частота  $f_{\Pi}$ , соответствует границе полосы пропускания на уровне 3 дБ. В диапазоне частот от  $f_{\Pi}$  до  $f_T$  модуль коэффициента усиления обратно пропорционален частоте, что приводит к простому соотношению

$$K_V f_{\Pi} = f_T.$$

Иными словами, частота единичного усиления  $f_T$  равна произведению коэффициента усиления на ширину полосы пропускания. Следует иметь в виду, что это утверждение справедливо только для усилителей с полной внутренней коррекцией (см. п. 1.6).

## 1.3. Основные схемы включения операционного усилителя

### 1.3.1. Дифференциальное включение

На Рис. 1.4 приведена схема дифференциального включения ОУ.

Найдем зависимость выходного напряжения ОУ от входных напряжений. Вследствие свойства (а) идеального операционного усилителя разность потенциалов между его входами  $p$  и  $n$  равна нулю. Соотношение между входным напряжением  $V_1$  и напряжением  $V_p$  между неинвертирующим входом и общей шиной с учетом свойства (б) определяется коэффициентом деления делителя на резисторах  $R_3$  и  $R_4$

$$V_p = V_1 R_4 / (R_3 + R_4). \quad (1.3)$$

Поскольку в силу свойства (а) напряжение между инвертирующим входом и общей шиной  $V_n = V_p$ , ток  $I_1$  определится соотношением

$$I_1 = (V_2 - V_p) / R_1. \quad (1.4)$$

Вследствие свойства (б) идеального ОУ  $I_1 = I_2$ . Выходное напряжение усилителя в таком случае равно

$$V_{OUT} = V_p - I_1 R_2. \quad (1.5)$$

Подставив (1.3) и (1.4) в (1.5), получим

$$V_{OUT} = \frac{(R_1 + R_2)R_4}{R_1(R_3 + R_4)} V_1 - \frac{R_2}{R_1} V_2. \quad (1.6)$$

При выполнении соотношения  $R_1 R_4 = R_2 R_3$

$$V_{OUT} = (V_1 - V_2) R_2 / R_1. \quad (1.7)$$

**Примечание 1.1.** Нетрудно убедиться, что соотношения (1.6), (1.7) справедливы и в случае, если вместо резисторов  $R_1$  и  $R_2$  включены любые пассивные двухполюсники, содержащие, в том числе, и реактивные элементы (конденсаторы и катушки индуктивности), с операторными импедансами  $Z_1(s)$  и  $Z_2(s)$  или даже нелинейные элементы (например, диоды).

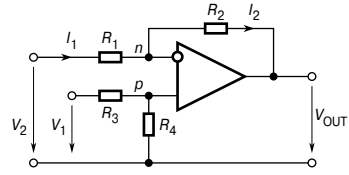


Рис. 1.4. Дифференциальное включение ОУ

### 1.3.2. Инвертирующее включение

При инвертирующем включении (Рис. 1.5) неинвертирующий вход ОУ соединяется с общей шиной.

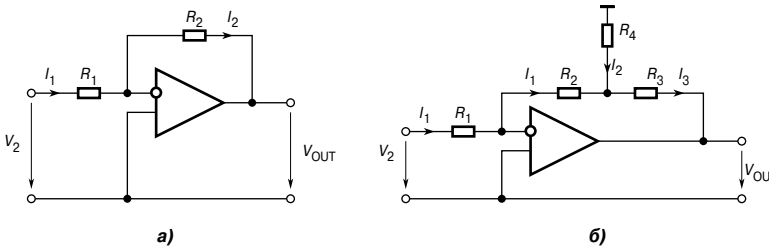


Рис. 1.5. Инвертирующее включение ОУ:

а — типовое, б — с Т-образным включением резисторов обратной связи