

**УДК 621.3.049.774.3**  
**ББК 32.844.1**

**B68**

Волович Г. И.  
B68 Схемотехника аналоговых и аналогово-цифровых электронных устройств. 4-ое изд., перераб. и доп. – М.: ДМК Пресс, 2018. –636 с.: ил.

**ISBN 978-5-97060-623-0**

В книге освещены свойства и особенности применения аналоговых и аналого-цифровых интегральных микросхем: операционных усилителей, компараторов, таймеров, фильтров, линейных и импульсных стабилизаторов напряжения, коммутаторов, микросхем АЦП и ЦАП различных датчиков. Основное внимание уделено схемотехнической реализации различных функций электронных устройств. Рассмотрены схемы линейного и нелинейного преобразования сигналов, измерительные и вычислительные схемы, активные электрические фильтры, генераторы и перемножители сигналов, специализированные усилители (широкополосные, изолирующие, измерительные и др.), источники опорного напряжения, различного типа цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, схемы датчиков температуры, ускорения, давления, влажности, магнитного поля.

Издание будет полезно специалистам в области электроники, автоматики, вычислительной техники, а также студентам и аспирантам соответствующего профиля.

УДК 621.3.049.774.3  
ББК 32.844.1

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

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 978-5-97060-623-0

© Волович В. И.  
© Оформление, издание, ДМК Пресс, 2018

Предисловие .....	1
Введение .....	3
<b>Глава 1. Операционные усилители</b> .....	5
1.1. История изобретения и развития операционных усилителей .....	5
1.2. Общие сведения об ОУ .....	7
1.3. Идеальный операционный усилитель .....	9
1.4. Основные схемы включения операционного усилителя .....	10
1.4.1. Дифференциальное включение .....	10
1.4.2. Инвертирующее включение .....	11
1.4.3. Неинвертирующее включение .....	12
1.5. Внутренняя схемотехника операционных усилителей .....	13
1.5.1. Требования к ОУ .....	13
1.5.2. Блок-схема операционного усилителя .....	14
1.5.3. Стандартная схема операционного усилителя .....	17
1.6. Схема замещения операционного усилителя .....	18
1.6.1. Входное сопротивление схемы .....	18
1.6.2. Выходное сопротивление схемы .....	19
1.7. Коррекция частотной характеристики .....	20
1.7.1. Частотные характеристики ОУ .....	20
1.7.2. Полная частотная коррекция .....	22
1.7.3. Подстраиваемая частотная коррекция .....	24
1.7.4. Скорость нарастания .....	25
1.7.5. Компенсация ёмкостной нагрузки .....	26
1.8. Параметры ОУ .....	27
1.8.1. Точностные параметры .....	27
1.8.2. Динамические параметры ОУ .....	38
1.8.3. Параметры, характеризующие усиление сигналов переменного тока .....	39
1.8.4. Эксплуатационные параметры ОУ .....	40
1.9. Типы операционных усилителей .....	40
1.10. Улучшение параметров операционных усилителей .....	47
1.10.1. Снижение напряжения смещения нуля .....	47
1.10.2. Повышение устойчивости ОУ .....	49
1.10.3. Снижение токов утечки .....	51
1.10.4. Защита ОУ .....	52
1.10.5. Повышение выходного тока ОУ .....	55
1.10.6. Повышение выходного напряжения ОУ .....	56
1.10.7. Повышение быстродействия ОУ .....	58
1.10.8. Снижение шума ОУ .....	60
1.10.9. Экспериментальное определение параметров ОУ .....	61
1.11. Однополярное питание операционных усилителей .....	63
1.11.1. Общие сведения .....	63
1.11.2. Смещение ОУ с однополярным питанием .....	64
1.11.3. Введение искусственной нулевой точки .....	66
1.11.4. Расширение динамического диапазона .....	68
Выводы .....	70
Вопросы и задачи .....	71
Литература к гл. 1 .....	73

<b>Глава 2. Функциональные устройства на ОУ</b> .....	74
2.1. Линейные аналоговые вычислительные схемы на ОУ .....	74
2.1.1. Схема масштабирования .....	74
2.1.2. Схемы суммирования .....	75
2.1.3. Схема интегрирования .....	77
2.1.4. Схема дифференцирования .....	79
2.2. Схемы линейного преобразования сигналов .....	81
2.2.1. Источники напряжения, управляемые током .....	81
2.2.2. Источники тока, управляемые напряжением .....	81
2.2.3. Преобразователь отрицательного сопротивления .....	93
2.2.4. Гираторы .....	94
2.3. Активные электрические фильтры на ОУ .....	97
2.3.1. Основные понятия .....	97
2.3.2. Фильтры нижних частот .....	98
2.3.3. Фильтры верхних частот .....	101
2.3.4. Полосовые фильтры .....	101
2.3.5. Полосно-подавляющие фильтры .....	102
2.3.6. Реализация фильтров на ОУ .....	103
2.3.7. Реализация активных фильтров на основе метода переменных состояния .....	110
2.3.8. Фазовые фильтры .....	114
2.4. Измерительные усилители .....	117
2.4.1. Измерительный усилитель на одном ОУ .....	117
2.4.2. Измерительный усилитель на двух ОУ .....	120
2.4.3. Измерительный усилитель на трёх ОУ .....	121
2.4.4. Другие измерительные усилители .....	122
2.4.5. Применение измерительных усилителей .....	126
2.5. Схемы нелинейного преобразования сигналов на ОУ .....	128
2.5.1. Логарифмирующие и экспоненциальные преобразователи .....	128
2.5.2. Прецизионные выпрямители на ОУ .....	134
2.5.3. Прецизионные ограничители на ОУ .....	139
2.6. Генераторы сигналов на ОУ .....	144
2.6.1. Релаксационные генераторы .....	145
2.6.2. Генераторы синусоидальных колебаний .....	148
2.7. Аналоговые перемножители .....	150
2.7.1. Перемножитель с управляемым сопротивлением канала полевого транзистора .....	150
2.7.2. Перемножители на основе управляемых источников тока .....	150
2.8. Измерительные схемы на ОУ .....	153
2.8.1. Измерение заряда .....	153
2.8.2. Измерители амплитуды (пиковые детекторы) .....	154
2.8.3. Фотоэлектрические измерения .....	156
2.8.4. Мостовые измерительные схемы .....	157
2.8.5. Измерение температуры .....	163
2.8.6. Измерение среднеквадратичного значения .....	165
2.8.7. Измерение тока .....	168
2.8.8. Измерение переменного тока .....	170
2.8.9. Измерение сопротивления изоляции .....	173
Вопросы и задачи .....	174
Литература к главе 2 .....	178

<b>Глава 3. Специализированные усилители.....</b>	<b>179</b>
3.1. Широкополосные усилители.....	179
3.1.1. Работа транзисторного усилительного каскада на высоких частотах .....	179
3.1.2. Применение ОУ для усиления радиочастотных сигналов .....	181
3.1.3. Широкополосные ОУ с обратной связью по току .....	183
3.1.4. Особенности применения ОУ с ОСТ .....	188
3.1.5. Усилители дифференциальных линий .....	188
3.1.6. Особенности проектирования печатных плат для схем с широкополосными усилителями .....	191
3.2. Полностью дифференциальные ОУ.....	200
3.2.1. Общие сведения .....	200
3.2.2. Схематехника ПД ОУ .....	200
3.2.3. Применение ПД ОУ R2.....	202
3.2.4. Несимметричные режимы ПД ОУ .....	205
3.3. Усилители с регулируемым усилением.....	207
3.3.1. Общие сведения .....	207
3.3.2. Схематехническая реализация УРУ .....	207
3.4. Изолирующие усилители .....	211
3.5. Усилители класса D .....	215
3.5.1. Общие сведения .....	215
3.5.2. Виды импульсной модуляции выходного сигнала.....	216
3.5.3. Схематехника выходных каскадов усилителей класса D .....	219
3.5.4. Промышленные типы усилителей класса D .....	220
3.5.5. Помехи, порождаемые усилителями класса D, и борьба с ними .....	222
Вопросы и задачи .....	224
Литература к гл. 3.....	225
<b>Глава 4. Аналоговые компараторы и таймеры .....</b>	<b>226</b>
4.1. Общие сведения о компараторах.....	226
4.2. Аналоговый интегральный компаратор .....	227
4.2.1. Принципы построения интегральных компараторов .....	227
4.2.2. Компараторы с однополярным питанием .....	229
4.2.3. Скоростные компараторы .....	231
4.3. Применение компараторов .....	232
4.3.1. Двухпороговый компаратор .....	232
4.3.2. Детектор пересечения нуля.....	232
4.3.3. Сравнение напряжений противоположной полярности .....	233
4.3.4. Мультивибраторы .....	233
4.3.5. Применение компаратора в качестве ОУ .....	235
4.3.6. Генератор, управляемый напряжением.....	236
4.3.7. Логические элементы.....	238
4.3.8. Одновибраторы.....	240
4.3.9. Генератор временных задержек .....	242
4.3.10. Широтно-импульсный модулятор .....	243
4.3.11. Двухполупериодный выпрямитель.....	244
4.3.12. Устройства на аналоговых компараторах для микропроцессорных систем ...	245
4.4. Параметры компараторов.....	247
4.5. Современные ИМС компараторов .....	248
4.6. Аналоговые таймеры .....	255

4.6.1. Таймер NE555 .....	255
4.6.2. Основные схемы включения таймера .....	256
4.6.3. Типы интегральных таймеров.....	258
Вопросы и задачи.....	260
Литература к гл. 4.....	260
<b>Глава 5. Линейные стабилизаторы напряжения .....</b>	<b>261</b>
5.1. Общие сведения .....	261
5.2. Схемотехника линейных стабилизаторов напряжения.....	261
5.2.1. Упрощённая схема стабилизатора .....	262
5.2.2. Интегральный линейный стабилизатор напряжения.....	262
5.2.3. Стабилизация отрицательных напряжений .....	264
5.2.4. Уменьшение потерь в стабилизаторах.....	265
5.3. Устойчивость линейных стабилизаторов напряжения.....	267
5.3.1. Устойчивость п-р-п-стабилизаторов.....	267
5.3.2. Устойчивость LDO-стабилизаторов .....	268
5.4. Основные параметры линейных стабилизаторов напряжения .....	270
5.4.1. Точностные параметры.....	270
5.4.2. Динамические параметры .....	271
5.4.3. Эксплуатационные параметры.....	273
5.5. Схемы включения линейных стабилизаторов напряжения .....	274
5.5.1. Типовое включение .....	274
5.5.2. Увеличение выходного напряжения .....	275
5.5.3. Повышение максимального выходного тока.....	275
5.5.4. Стабилизация тока.....	276
5.5.5. Источник двухполярного напряжения .....	276
5.5.6. Стабилизатор переменного напряжения.....	277
5.5.7. Мощный эмиттерный повторитель .....	277
5.5.8. Программное управление включением источников питания.....	278
5.6. Источники опорного напряжения.....	279
5.6.1. ИОН на стабилитронах.....	279
5.6.2. ИОН с напряжением запрещённой зоны .....	281
5.6.3. ИОН на полевых транзисторах.....	285
5.6.4. Устойчивость ИОН .....	286
5.6.5. Параметры источников опорного напряжения .....	288
5.6.6. Применение ИОН.....	295
Вопросы и задачи.....	299
Литература к гл. 5.....	300
<b>Глава 6. Импульсные стабилизаторы напряжения.....</b>	<b>301</b>
6.1. Общие сведения .....	301
6.2. Понижающий импульсный стабилизатор.....	302
6.2.1. Схема понижающего импульсного стабилизатора напряжения.....	302
6.2.2. Электромагнитные процессы в понижающем ИСН.....	304
6.2.3. Понижающие ИСН с синхронными выпрямителями.....	307
6.2.4. Многофазные ИСН.....	308
6.3. Повышающий импульсный стабилизатор .....	310
6.4. Инвертирующий импульсный стабилизатор .....	312
6.5. Другие составные схемы ИСН.....	313
6.5.1. Схема Кука.....	313

6.5.2. Несимметричный преобразователь первичной индуктивности.....	315
6.6. Инверторные схемы.....	317
6.6.1. Общие сведения.....	317
6.6.2. Нерегулируемые инверторы.....	317
6.6.3. Регулируемые инверторы.....	321
6.6.4. Однотактные инверторы.....	324
6.6.5. Резонансные инверторы.....	329
6.7. Сетевые источники питания.....	336
6.7.1. Общие сведения.....	336
6.7.2. Импульсные сетевые источники на базе обратногоходового преобразователя.....	337
6.7.3. Организация обратной связи по выходному напряжению в сетевых источниках.....	340
6.7.4. Микро мощные бестрансформаторные сетевые источники.....	343
6.8. Импульсные источники на коммутируемых конденсаторах.....	345
6.9. Корректоры коэффициента мощности.....	349
6.9.1. Общие положения.....	349
6.9.2. Алгоритмы формирования кривой входного тока.....	350
6.9.3. Контроллеры ККМ для сетей с широким диапазоном напряжений.....	354
6.10. Драйверы светодиодов.....	356
6.10.1. Общие сведения.....	356
6.10.2. Светодиодные драйверы на повышающих индуктивных преобразователях.....	357
6.10.3. Светодиодные драйверы на коммутируемых конденсаторах.....	358
6.11. Драйверы силовых ключей.....	359
6.11.1. Общие сведения.....	359
6.11.2. Схемы драйверов биполярных транзисторов.....	360
6.11.3. Драйверы МОП-транзисторов и IGBT.....	361
6.11.4. Простейшие схемы драйверов.....	362
6.11.5. Защита силовых ключей.....	364
6.11.6. Микросхемы драйверов МОП-транзисторов и IGBT.....	366
6.11.7. Драйверы IGBT-модулей.....	373
6.12. Устойчивость импульсных стабилизаторов напряжения.....	375
6.12.1. Общие сведения.....	375
6.12.2. Устойчивость импульсных стабилизаторов с обратной связью по напряжению.....	375
6.12.3. Устойчивость импульсных стабилизаторов с дополнительной обратной связью по току дросселя.....	378
6.12.4. Особенности анализа устойчивости ИСН с силовыми трансформаторами.....	384
6.13. Моделирование однотактных импульсных преобразователей в пакете VisSim.....	385
6.13.1. Общие сведения.....	385
6.13.2. Моделирование в VisSime электрических цепей.....	386
6.13.3. Модели силовых ключей.....	387
6.13.4. Моделирование в VisSime понижающих импульсных преобразователей.....	388
6.13.5. Моделирование системы управления преобразователем.....	389
6.13.6. Моделирование повышающего импульсного преобразователя.....	392
6.13.7. Моделирование инвертирующего импульсного преобразователя.....	392

6.13.8. Моделирование преобразователя Кука.....	393
6.13.9. Моделирование SEPIC-преобразователя.....	394
Вопросы и задачи.....	395
Литература к главе 6.....	397
<b>Глава 7. Аналоговые коммутаторы</b> .....	399
7.1. Общие сведения .....	399
7.2. Электронные коммутаторы.....	400
7.3. Коммутаторы на полевых транзисторах.....	400
7.4. Промышленные аналоговые коммутаторы.....	402
7.4.1. Простейшие коммутаторы.....	402
7.4.2. Аналоговые мультиплексоры .....	404
7.4.3. Видеокоммутаторы и видеомultipлексоры.....	406
7.4.4. Матричные коммутаторы.....	407
7.4.5. Оптореле .....	410
7.5. Характеристики аналоговых коммутаторов.....	411
7.5.1. Статические характеристики.....	411
7.5.2. Динамические характеристики.....	413
7.5.3. Эксплуатационные параметры.....	416
7.6. Применение аналоговых коммутаторов .....	418
7.6.1. Влияние нелинейности аналоговых коммутаторов на искажения передаваемых сигналов .....	418
7.6.2. Защита коммутаторов от перенапряжений.....	419
7.7. Устройства выборки-хранения .....	420
7.7.1. Схемы устройств выборки-хранения.....	420
7.7.2. Основные характеристики УВХ.....	422
7.7.3. Применение УВХ .....	427
7.8. Устройства на переключаемых конденсаторах.....	428
Вопросы и задачи.....	431
Литература к главе 7.....	432
<b>Глава 8. Цифро-аналоговые преобразователи</b> .....	433
8.1. Общие сведения .....	433
8.2. Параллельные ЦАП.....	435
8.2.1. ЦАП с суммированием весовых токов .....	435
8.2.2. Параллельный ЦАП на переключаемых конденсаторах (ЦАП с суммированием зарядов).....	445
8.2.3. ЦАП с суммированием напряжений.....	446
8.3. Последовательные ЦАП.....	449
8.3.1. ЦАП с время-импульсной модуляцией .....	449
8.3.2. Последовательный ЦАП на переключаемых конденсаторах.....	450
8.4. Интерфейсы цифро-аналоговых преобразователей.....	450
8.4.1. ЦАП с последовательным интерфейсом входных данных .....	451
8.4.2. ЦАП с параллельным интерфейсом входных данных .....	452
8.5. Параметры ЦАП .....	453
8.5.1. Статические параметры.....	453
8.5.2. Точность воспроизведения сигналов переменного тока .....	455
8.5.3. Динамические параметры .....	455
8.5.4. Шумы ЦАП.....	456
8.6. Современные модели промышленных ЦАП .....	456
8.7. Применение ЦАП .....	462

8.7.1. Обработка чисел со знаком.....	463
8.7.2. Перемножители и делители функций.....	464
8.7.3. Атенюаторы и интеграторы на ЦАП.....	466
8.7.4. Системы прямого цифрового синтеза сигналов.....	466
Вопросы и задачи.....	470
Литература к главе 8.....	471
<b>Глава 9. Аналого-цифровые преобразователи.....</b>	<b>472</b>
9.1. Общие сведения.....	472
9.1.1. Процедура аналого-цифрового преобразования.....	472
9.1.2. Апертурная погрешность.....	477
9.1.3. Шум квантования.....	478
9.1.4. Классификация АЦП.....	479
9.2. Параллельные АЦП.....	480
9.3. Последовательно-параллельные АЦП.....	481
9.3.1. Многоступенчатые АЦП.....	481
9.3.2. Конвейерные АЦП.....	482
9.3.3. Многотактные последовательно-параллельные АЦП.....	484
9.4. Последовательные АЦП.....	485
9.4.1. АЦП последовательного счёта.....	485
9.4.2. АЦП последовательного приближения.....	486
9.5. Интегрирующие АЦП.....	488
9.5.1. АЦП многотактного интегрирования.....	488
9.5.2. Сигма-дельта-АЦП.....	491
9.5.3. Преобразователи напряжение—частота.....	500
9.6. Сигма-дельта-ЦАП.....	501
9.7. Интерфейсы АЦП.....	505
9.7.1. Сопряжение входов АЦП с источниками аналоговых сигналов.....	505
9.7.2. Цифровые интерфейсы АЦП.....	509
9.7.3. АЦП с параллельным интерфейсом выходных данных.....	511
9.7.4. АЦП с последовательным интерфейсом выходных данных.....	511
9.7.5. Последовательный интерфейс сигма-дельта-АЦП с процессорами.....	512
9.8. Параметры АЦП.....	513
9.8.1. Статические параметры.....	513
9.8.2. Динамические параметры.....	515
9.8.3. Шумы АЦП.....	515
9.8.4. Параметры, характеризующие качество преобразования сигналов переменного тока.....	516
9.9. Современные тенденции развития АЦП.....	517
9.10. Применение АЦП.....	525
9.10.1. Системы сбора данных.....	525
9.10.2. Кодеки.....	530
9.10.3. Измерение параметров электроэнергии.....	531
9.10.4. Управление двигателями переменного тока.....	536
9.10.5. Преобразователи ёмкость—код на основе дельта-сигма-модуляторов.....	539
Вопросы и задачи.....	541
Список литературы к гл. 9.....	542
<b>Глава 10. Интегральные датчики.....</b>	<b>543</b>
10.1. Датчики температуры.....	543
10.1.1. Интегральные датчики температуры на биполярных транзисторах.....	453



10.1.2. Датчики температуры с цифровым выходом .....	549
10.1.3. Температурные компараторы .....	551
10.1.4. Точность датчиков температуры .....	552
10.2. Датчики ускорения (акселерометры) .....	554
10.2.1. Общие сведения .....	554
10.2.2. Плёночные пьезоэлектрические акселерометры .....	555
10.2.3. Объёмные интегральные акселерометры .....	556
10.2.4. Поверхностные интегральные акселерометры .....	557
10.2.5. Тепловые акселерометры .....	565
10.2.6. Точность интегральных акселерометров .....	568
10.3. Интегральные (микромеханические) гироскопы .....	572
10.3.1. Общие сведения .....	572
10.3.2. Микромеханические гироскопы .....	573
10.3.3. Параметры интегральных гироскопов .....	580
10.3.4. Промышленные модели интегральных гироскопов .....	582
10.4. Датчики давления .....	589
10.4.1. Общие сведения .....	589
10.4.2. Устройство датчиков давления .....	590
10.4.3. Точность датчиков давления .....	592
10.5. Датчики влажности (гигрометры) .....	594
10.5.1. Общие сведения .....	594
10.5.2. Основные параметры датчиков влажности .....	598
10.6. Датчики магнитного поля .....	598
10.6.1. Принцип действия датчика Холла .....	598
10.6.2. Интегральные микросхемы с датчиками Холла .....	601
10.6.3. Применение датчиков Холла .....	604
10.6.4. Основные характеристики и параметры датчиков Холла .....	615
Вопросы и задачи .....	617
Литература к главе 10 .....	618
<b>Предметный указатель .....</b>	<b>620</b>