

УДК 621.375.024
ББК 32.846

Издание подготовлено при участии российского представительства компании Texas Instruments.
На русскоязычном сайте www.ti.com/ru вы можете получить информацию о компании TI,
а также заказать бесплатные образцы микросхем.

Телефон горячей линии технической поддержки +7-495-981-07-01.

Картер, Брюс.

Операционные усилители для всех / Б. Картер, Р. Манчини ; пер. с англ. А.Н. Рабодзея. — 2-е изд., эл. — 1 файл pdf : 529 с. — Москва : ДМК Пресс, Додэка-XXI, 2023. — (Схемотехника). — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-564-0

Книга написана группой сотрудников компании Texas Instruments Incorporated — одного из ведущих мировых изготовителей операционных усилителей (ОУ).

Изложенный материал включает как основы электротехники и вводные понятия об ОУ, так и рассмотрение различных областей применения ОУ, начиная от элементарных схем инвертирующих и неинвертирующих усилителей и сумматоров и до разнообразных генераторов, активных фильтров (включая простые практические методы их расчётов), интерфейсов для АЦП и ЦАП и пр. В книге используется минимум математики, зато много внимания уделено практическим аспектам использования ОУ, включая методы компенсации АЧХ для обеспечения стабильности ОУ, шумы ОУ, особенности применения ОУ в схемах с однополярным питанием и в низковольтных схемах, конструирование печатных плат с ОУ и наиболее распространённые ошибки применения ОУ. Большой интерес представляют главы, в которых рассмотрены ОУ с обратной связью по току, сначала самостоятельно, а затем в сопоставлении с ОУ с ОС по напряжению, а также полностью дифференциальные ОУ. В приложении приведена полезная коллекция схем, иллюстрирующая возможности, реализуемые при использовании ОУ.

Книга предназначена для широкого круга специалистов: от студентов, начинающих инженеров и техников в области аналоговой электроники до опытных разработчиков.

УДК 621.375.024
ББК 32.846

Электронное издание на основе печатного издания: Операционные усилители для всех / Б. Картер, Р. Манчини ; пер. с англ. А. Н. Рабодзея. — Москва : ДМК Пресс, Додэка-XXI, 2016. — 528 с. — (Схемотехника). — ISBN 978-5-97060-197-6. — Текст : непосредственный.

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

Книга «Операционные усилители для всех» Брюса Картера и Рона Манчини подготовлена и издана по договору с Elsevier Inc., 30 Corporate Drive, 4th Floor, Burlington, MA 01803, USA.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-564-0

© Elsevier Inc., 2009
© Макет, Издательский дом «Додэка-XXI», 2011
© Издание, ДМК Пресс, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание	V
Важные замечания	1
Посвящение	3
Предисловие	4
Сведения об авторах первого издания	4
Предисловие к третьему изданию	5

Глава 1	
МЕСТО ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В МИРЕ ЭЛЕКТРОНИКИ	6
1.1. Суть проблемы	6
1.2. Решение	6
1.3. Рождение операционных усилителей	7
1.4. Эра электровакуумных ламп	8
1.5. Эра транзисторов	9
1.6. Эра интегральных микросхем	9
Литература	11

Глава 2	
ВВЕДЕНИЕ В ТЕОРИЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	12
2.1. Введение	12
2.2. Физические законы	12
2.3. Правило расчёта делителя напряжения	14
2.4. Правило расчёта делителя тока	15
2.5. Теорема Тевенина	16
2.6. Суперпозиция	18
2.7. Расчёт транзисторной схемы, работающей в ключевом режиме	20
2.8. Транзисторный усилитель	21

Глава 3

ИДЕАЛЬНЫЙ ОУ И УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ ЕГО РАБОТУ	23
3.1. Понятие идеального ОУ	23
3.2. Неинвертирующий усилитель.....	24
3.3. Инвертирующий усилитель.....	25
3.4. Сумматор.....	26
3.5. Дифференциальный усилитель.....	27
3.6. Схемы со сложными цепями ОС.....	29
3.7. Видеоусилители	30
3.8. Конденсаторы.....	31
3.9. Почему идеальные ОУ разрушили бы Вселенную.....	32
3.10. Заключение.....	33

Глава 4

КОНСТРУИРОВАНИЕ СХЕМ НА ОУ С ОДНОПОЛЯРНЫМ ПИТАНИЕМ	35
4.1. Одно напряжение питания или два?	35
4.2. Анализ схем.....	37
4.3. Системы уравнений	41
4.3.1. Случай 1. $V_{OUT} = +mV_{IN} + b$	42
4.3.2. Случай 2. $V_{OUT} = +mV_{IN} - b$	46
4.3.3. Случай 3. $V_{OUT} = -mV_{IN} + b$	48
4.3.4. Случай 4. $V_{OUT} = -mV_{IN} - b$	51
4.4. Резюме	53

Глава 5

ПРОСТЕЙШИЕ СХЕМЫ НА ОУ	55
5.1. Многообразие схем применения ОУ.....	55
5.2. Неинвертирующий аттенюатор без смещения нуля.....	56
5.3. Неинвертирующий аттенюатор с положительным смещением нуля	56
5.4. Неинвертирующий аттенюатор с отрицательным смещением нуля.....	56
5.5. Инвертирующий аттенюатор без смещения нуля	57
5.6. Инвертирующий аттенюатор с положительным смещением нуля.....	57
5.7. Инвертирующий аттенюатор с отрицательным смещением нуля.....	58
5.8. Заключение.....	58

Глава 6

ТЕОРИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ	59
6.1. Зачем изучать теорию обратной связи?	59

6.2. Структурные схемы и математический анализ их работы	59
6.3. Уравнения обратной связи и стабильность.....	63
6.4. Анализ схем с ОС с помощью диаграмм Боде	64
6.5. Диаграммы Боде и стабильность усилителей с ОС.....	69
6.6. Уравнения второго порядка и предупреждение выбросов и звона.....	72
Литература	73

Глава 7

НЕИДЕАЛЬНЫЕ ОУ И КАК С НИМИ ОБРАЩАТЬСЯ.....	74
7.1. Введение	74
7.2. Обзор канонических уравнений.....	75
7.3. Неинвертирующий усилитель на ОУ.....	77
7.4. Инвертирующий усилитель на ОУ	79
7.5. Дифференциальный усилитель на ОУ	80

Глава 8

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ОУ С ОС ПО НАПРЯЖЕНИЮ	82
8.1. Введение.....	82
8.2. Встроенная компенсация.....	83
8.3. Внешняя компенсация, стабильность и характеристики	88
8.4. Компенсация с помощью доминантного полюса.....	89
8.5. Компенсация путём изменения коэффициента усиления	92
8.6. Компенсация с опережением по фазе	93
8.7. Компенсация влияния паразитных ёмкостей	96
8.8. Компенсация с опережением и задержкой.....	98
8.9. Сравнение различных методов компенсации.....	100
8.10. Заключение.....	101

Глава 9

ПРИМЕНЕНИЕ ОУ С ОС ПО ТОКУ	102
9.1. Введение.....	102
9.2. Модель ОУ с ОС по току	102
9.3. Уравнения, описывающие стабильность	103
9.4. Неинвертирующий усилитель на ОУ с ОС по току	104
9.5. Инвертирующий усилитель на ОУ с ОС по току	106
9.6. Анализ стабильности.....	107
9.7. Выбор резистора в цепи ОС.....	110
9.8. Стабильность и входная ёмкость	112

9.9. Стабильность и ёмкость в цепи ОС	113
9.19. Компенсация влияния C_F и C_G	114
9.11. Резюме	114

Глава 10

СРАВНЕНИЕ ОУ С ОС ПО НАПРЯЖЕНИЮ И ПО ТОКУ	116
10.1. Введение	116
10.2. Точность	116
10.3. Диапазон рабочих частот	118
10.4. Стабильность	120
10.5. Импеданс	122
10.6. Сравнение уравнений	123

Глава 11

ПОЛНОСТЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ОУ	125
11.1. Введение	125
11.2. Что значит полностью дифференциальный ОУ?	125
11.3. Как используется второй выход?	126
11.4. Полностью дифференциальный каскад	126
11.5. Преобразование несимметричных сигналов в дифференциальные	127
11.6. Работа с несимметричными входными сигналами	128
11.7. Новые функции	129
11.8. Использование вывода $V_{ОСМ}$ в качестве входа управления смещением выходов	130
11.9. Инструментальные усилители	131
11.10. Схемы фильтров	132
11.10.1. Однополюсный фильтр	132
11.10.2. Двухполюсные фильтры	132
11.10.3. Фильтры с несколькими цепями ОС	134
11.10.4. Биквадратный фильтр	136

Глава 12

ШУМЫ В ОУ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА	137
12.1. Введение	137
12.2. Определения	137
12.2.1. Среднеквадратичное и пиковое значения напряжения шумов	137
12.2.2. Уровень собственных шумов	138
12.2.3. Отношение сигнал/шум	139
12.2.4. Суммирование шумов от различных источников	139

12.2.5. Единицы измерения.....	139
12.3. Типы шумов	140
12.3.1. Дробовые шумы	140
12.3.2. Тепловые шумы.....	142
12.3.3. Фликкер-шум.....	144
12.3.4. Импульсные шумы	144
12.3.5. Шумы лавинного пробоя.....	145
12.4. Цвета шумов.....	145
12.4.1. Белый шум	146
12.4.2. Розовый шум	147
12.4.3. Красный и коричневый шумы.....	147
12.5. Шумы операционных усилителей.....	147
12.5.1. Частота излома шумовой характеристики и суммарные шумы.....	147
12.5.2. Частота излома шумовой характеристики.....	148
12.5.3. Шумовая модель ОУ	149
12.5.4. Шумы в инвертирующем усилителе на ОУ	150
12.5.5. Шумы в неинвертирующем усилителе на ОУ.....	152
12.5.6. Шумы в дифференциальном усилителе на ОУ.....	152
12.5.7. Резюме	153
12.6. Реальные схемы.....	153
Литература	157

Глава 13

ПАРАМЕТРЫ ОУ	158
13.1. Введение	158
13.2. Температурный коэффициент входного тока	161
13.3. Температурный коэффициент напряжения смещения	162
13.4. Погрешность дифференциального коэффициента усиления.....	162
13.5. Запас устойчивости по коэффициенту усиления	162
13.6. Коэффициент усиления с разомкнутой цепью ОС	163
13.7. Коэффициент усиления при большом сигнале	164
13.8. Дифференциальный коэффициент усиления при большом сигнале	164
13.9. Частота единичного усиления.....	165
13.10. Ширина полосы пропускания по заданному уровню	165
13.11. Полоса частот.....	165
13.12 Входная ёмкость	166
13.13. Входная ёмкость для синфазных сигналов	166
13.14. Дифференциальная входная ёмкость	167
13.15. Ёмкость нагрузки	167
13.16. Коэффициент влияния напряжения питания	167
13.17. Коэффициент ослабления синфазного сигнала	168

Х ■ Содержание

13.18. Частота.....	168
13.19. Произведение коэффициента усиления на полосу частот	168
13.20. Ток потребления в режиме блокировки	169
13.21. Ток потребления.....	169
13.22. Диапазон входных токов.....	169
13.23. Входной ток	169
13.24. Разность входных токов	170
13.25. Спектральная плотность приведённого ко входу шумового тока.....	170
13.26. Выходной ток.....	171
13.27. Выходной ток низкого уровня	171
13.28. Выходной ток короткого замыкания	171
13.29. Рассеиваемая мощность.....	171
13.30. Коэффициент подавления пульсаций напряжения питания	171
13.31. Тепловое сопротивление кристалл — окружающая среда	172
13.32. Тепловое сопротивление кристалл — корпус	174
13.33. Входное сопротивление.....	174
13.34. Дифференциальное входное сопротивление.....	174
13.35. Сопротивление нагрузки.....	174
13.36. Сопротивление R_{null}	174
13.37. Выходное сопротивление.....	175
13.38. Сопротивление источника сигналов	175
13.39. Скорость нарастания напряжения.....	175
13.40. Рабочая температура.....	177
13.41. Время выключения (переход в режим блокировки)	177
13.42. Время включения (выход из режима блокировки).....	177
13.43. Время спада	177
13.44. Коэффициент нелинейных искажений	177
13.45. Коэффициент нелинейных искажений плюс шумы.....	178
13.46. Максимально допустимая температура кристалла.....	180
13.47. Время нарастания	180
13.48. Время установления	180
13.49. Температура хранения.....	181
13.50. Напряжение питания	181
13.51. Диапазон входных напряжений.....	181
13.52. Входное синфазное напряжение	181
13.53. Диапазон входных синфазных напряжений.....	182
13.54. Входное дифференциальное напряжение.....	182
13.55. Диапазон входных дифференциальных напряжений	183
13.56. Напряжение включения (при выходе из режима блокировки).....	183
13.57. Напряжение выключения (при переходе в режим блокировки).....	183
13.58. Входное напряжение.....	183

13.59. Напряжение смещения на входе	183
13.60. Спектральная плотность приведённого ко входу напряжения шумов	184
13.61. Напряжение шумов в полосе частот	185
13.62. Выходное напряжение высокого уровня	185
13.63. Выходное напряжение низкого уровня	186
13.64. Максимальный размах выходного напряжения	186
13.65. Размах выходного напряжения	187
13.66. Размах напряжения прямоугольных импульсов	187
13.67. Перекрёстные искажения	187
13.68. Выходной импеданс	187
13.69. Трансимпеданс при разомкнутой ОС	188
13.70. Ширина полосы при неравномерности АЧХ 0.1 дБ	189
13.71. Дифференциальная фазовая погрешность	189
13.72. Запас устойчивости по фазе	189
13.73. Температура корпуса в течение 60 с	190
13.74. Постоянная рассеиваемая мощность	190
13.75. Продолжительность короткого замыкания выхода	190
13.76. Долговременный дрейф входного напряжения смещения	190
13.77. Температура выводов в течение 10 или 60 с	191

Глава 14

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ: ДАТЧИКИ И АЦП	192
14.1. Введение	192
14.2. Типы датчиков	197
14.3. Выполнение разработки	202
14.4. Обзор спецификаций системы (пример)	203
14.5. Характеристики источника опорного напряжения	204
14.6. Характеристики датчика	204
14.7. Характеристики АЦП	206
14.8. Выбор ОУ	207
14.9. Разработка схемы усилителя	207
14.10. Испытания	213
14.11. Резюме	214
Литература	214

Глава 15

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОУ В КАЧЕСТВЕ ИНТЕРФЕЙСА К АЦП	215
15.1. Введение	215
15.2. Информация о системе	215

15.3. Информация об источниках питания	216
15.4. Информация об источнике входного сигнала	217
15.5. Информация о параметрах и характеристиках АЦП	219
15.6. Информация о параметрах и характеристиках ОУ	220
15.7. Архитектурные решения	220

Глава 16

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ТРАКТАХ ПЧ	224
16.1. Введение	224
16.2. Системы радиосвязи	224
16.3. Выбор АЦП и ЦАП	228
16.4. Факторы, влияющие на выбор ОУ	232
16.5. Сглаживающие фильтры	234
16.6. Восстанавливающие фильтры для коммуникационных ЦАП	235
16.7. Цепи внешних источников опорного напряжения для АЦП и ЦАП	238
16.8. Высокоскоростные схемы управления аналоговыми сигналами	240
Литература	243

Глава 17

ПРИМЕНЕНИЕ ОУ В ВЧ УЗЛАХ	244
17.1. Введение	244
17.2. Достоинства	245
17.3. Недостатки	245
17.4. ОС по напряжению или по току?	245
17.5. Обзор традиционных ВЧ усилителей	246
17.6. Коэффициенты усиления по напряжению и по мощности	249
17.7. Параметры рассеяния	250
17.7.1. Входной и выходной КСВН (S_{11} и S_{22})	251
17.7.2. Потери на отражение	251
17.7.3. Прямой коэффициент передачи (S_{21})	252
17.7.4. Обратный коэффициент передачи	253
17.8. Фазовая линейность	255
17.9. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики	255
17.10. Точка компрессии –1 дБ	256
17.11. Точка пересечения третьего порядка при двухчастотном сигнале	257
17.12. Коэффициент шума	258
17.13. Заключение	260

Глава 18

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОУ СОВМЕСТНО С ЦАП	261
18.1. Введение	261
18.2. Характеристики нагрузки	262
18.2.1. Нагрузка по постоянному току	262
18.2.2. Нагрузка по переменному току	262
18.3. ЦАП и их спецификации	262
18.3.1. Типы ЦАП	262
18.3.2. Простейший ЦАП на основе цепочки резисторов	262
18.3.3. ЦАП с формированием весовых токов резистивными цепями	263
18.3.4. ЦАП типа $R/2R$	264
18.3.5. Сигма-дельта ЦАП	266
18.4. Расчёт погрешностей ЦАП	267
18.4.1. Точность и разрешение	267
18.4.2. Расчёт погрешностей по постоянному току	267
18.4.3. Расчёт погрешностей по переменному току	269
18.4.4. Расчёт погрешностей при использовании ЦАП в диапазоне радиочастот	270
18.5. Параметры и погрешности ЦАП	271
18.5.1. Параметры и погрешности ЦАП на постоянном токе	271
18.5.2. Параметры и погрешности ЦАП на переменном токе	275
18.6. Компенсация паразитных ёмкостей ЦАП	278
18.7. Увеличение выходного тока и напряжения буфера	279
18.7.1. Усилитель тока	280
18.7.2. Усилитель напряжения	281
18.7.3. Усилители мощности	282
18.7.4. Однополярное питание и напряжение смещения	282

Глава 19

ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ	284
19.1. Что такое генератор синусоидальных сигналов	284
19.2. Условия возбуждения автоколебаний	285
19.3. Сдвиг фаз в генераторах	286
19.4. Коэффициент усиления	287
19.5. Влияние активных элементов (ОУ) на генератор	288
19.6. Анализ схем и работы генераторов	290
19.7. Генераторы синусоидальных сигналов	292
19.7.1. Генератор с мостом Вина	292
19.7.2. Генератор на фазосдвигающей цепочке с одним усилителем	298
19.7.3. Генератор на фазосдвигающих цепочках с буферами	300
19.7.4. Генератор Бубба	301

19.7.5. Квадратурный генератор	302
19.8. Заключение	304
Литература	304

Глава 20

АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ	305
20.1. Введение	305
20.2. Основы фильтров нижних частот	306
20.2.1. ФНЧ Баттерворта	309
20.2.2. ФНЧ Чебышева	310
20.2.3. ФНЧ Бесселя	311
20.2.4. Добротность	313
20.2.5. Заключение	314
20.3. Конструирование фильтров нижних частот (ФНЧ)	314
20.3.1. ФНЧ первого порядка	315
20.3.2. ФНЧ второго порядка	317
20.3.3. ФНЧ высокого порядка	321
20.4. Разработка фильтров верхних частот (ФВЧ)	323
20.4.1. ФВЧ первого порядка	324
20.4.2. ФВЧ второго порядка	325
20.4.3. ФВЧ высокого порядка	328
20.5. Конструирование полосовых фильтров	329
20.5.1. Полосовой фильтр второго порядка	330
20.5.2. Полосовой фильтр четвёртого порядка с взаимной расстройкой связанных контуров	333
20.6. Режекторные фильтры	336
20.6.1. Активный фильтр с двойным Т-мостом	337
20.6.2. Активный фильтр Вина — Робинсона	338
20.7. Разработка фазовых фильтров	340
20.7.1. Фазовый фильтр первого порядка	342
20.7.2. Фазовые фильтры второго порядка	343
20.7.3. Фазовые фильтры высокого порядка	344
20.8. Практические советы по проектированию	345
20.8.1. Цепи смещения	345
20.8.2. Выбор конденсаторов	348
20.8.3. Номиналы элементов	350
20.8.4. Выбор ОУ	350
20.9. Таблицы коэффициентов фильтров	352
Литература	359

Глава 21

КОНСТРУИРОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ	360
21.1. Введение	360
21.2. Выбор АЧХ.....	360
21.3. ФНЧ.....	362
21.4. ФВЧ.....	363
21.5. Узкополосный полосовой фильтр	364
21.6. Широкополосные фильтры	366
21.7. Узкополосный режекторный фильтр	367
21.8. Широкополосный режекторный фильтр.....	369
21.9. Обзор характеристик фильтров.....	370

Глава 22

КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ.....	371
22.1. Введение	371
22.2. Высокочастотный ФНЧ	371
22.3. Высокочастотный ФВЧ.....	371
22.4. Высокочастотные полосовые фильтры	372
22.4.1. Изменённая схема Дельянна	373
22.4.2. Изменённая схема фильтра Дельянна и многопетлевая схема	375
22.4.3. Результаты лабораторных испытаний.....	377
22.5. Высокочастотные режекторные фильтры	379
22.5.1. Моделирование	380
22.5.2. Результаты лабораторных испытаний	382
22.5.3. Результаты испытаний фильтра с центральной частотой 1 МГц.....	383
22.5.4. Результаты испытаний фильтра с центральной частотой 100 кГц.....	383
22.5.5. Результаты испытаний фильтра с центральной частотой 10 кГц	385
22.6. Заключение	387

Глава 23

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИЙ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ	388
23.1. Общие вопросы.....	388
23.1.1. Печатная плата как компонент конструкции схемы с ОУ	388
23.1.2. Опытный образец!	388
23.1.3. Источники шумов.....	389
23.2. Механическая конструкция печатных плат.....	390
23.2.1. Правильный выбор материала	390
23.2.2. Сколько слоёв лучше?	391
23.2.3. Расположение слоёв в печатной плате	394

23.3. Заземление	395
23.3.1. Самое важное правило: разделяйте землю.....	395
23.3.2. Другие правила выполнения заземлений.....	395
23.3.3. Хороший пример.....	397
23.3.4. Характерные исключения	398
23.4. Частотные характеристики пассивных компонентов.....	399
23.4.1. Резисторы.....	399
23.4.2. Конденсаторы.....	400
23.4.3. Индуктивности	401
23.4.4. Пассивные компоненты, создаваемые печатной платой.....	402
23.5. Развязка по питанию.....	409
23.5.1. Цифровые схемы — основной враг аналоговых схем	409
23.5.2. Правильный выбор блокировочного конденсатора	410
23.5.3. Развязка питания микросхем.....	411
23.5.4. Развязка на плате.....	412
23.6. Развязка входов и выходов	412
23.7. Корпуса	412
23.7.1. Монтаж в отверстия.....	415
23.7.2. Поверхностный монтаж	416
23.7.3. Неиспользуемые секции ОУ.....	416
23.8. Резюме	416
Литература	418

Глава 24

КОНСТРУИРОВАНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ СХЕМ С ОУ	419
24.1. Введение	419
24.2. Динамический диапазон.....	421
24.3. Отношение сигнал/шум	423
24.4. Диапазон входных синфазных напряжений.....	424
24.5. Размах выходного напряжения	428
24.6. Блокировка и малый ток потребления.....	430
24.7. Конструирование схем с однополярным питанием	431
24.8. Интерфейс между датчиком и АЦП	431
24.9. Интерфейс между ЦАП и исполнительным механизмом.....	434
24.10. Сравнение ОУ	438
24.11. Резюме.....	440

Глава 25

НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЁННЫЕ ОШИБКИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОУ	442
25.1. Введение	442

25.2. Работа ОУ при коэффициенте усиления меньше единицы или оговоренного в спецификации значения.....	442
25.3. Применение ОУ в качестве компаратора.....	444
25.3.1. Компаратор	446
25.3.2. Операционный усилитель.....	446
25.3.3. Неправильное подключение неиспользуемых ОУ.....	447
25.5. Коэффициент усиления по постоянному току	449
25.6. Источник тока.....	449
25.7. ОУ с ОС по току: замыкание резистора в цепи ОС.....	450
25.8. ОУ с ОС по току: конденсатор в цепи ОС.....	452
25.9. Полностью дифференциальный ОУ: неправильное подключение к однополярному источнику сигналов.....	452
25.10. Полностью дифференциальный ОУ: неверный выбор рабочей точки по постоянному току	453
25.11. Полностью дифференциальный ОУ: неверный выбор синфазного диапазона.....	455
25.12. Ошибка разработчика номер 1	456

Приложение А

КОЛЛЕКЦИЯ СХЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ОУ С ОДНОПОЛЯРНЫМ ПИТАНИЕМ.....	459
A.1. Введение	459
A.2. Инструментальный усилитель	459
A.3. Упрощённый инструментальный усилитель	460
A.4. Т-образная схема в цепи ОС.....	461
A.5. Инвертирующий интегратор.....	462
A.6. Инвертирующий интегратор с компенсацией входного тока.....	463
A.7. Инвертирующий интегратор с компенсацией дрейфа	464
A.8. Инвертирующий интегратор с механическим сбросом	464
A.9. Инвертирующий интегратор с электронным сбросом	465
A.10. Инвертирующий интегратор с резистивным сбросом	466
A.11. Неинвертирующий интегратор с инвертирующим буфером.....	467
A.12. Неинвертирующий интегратор на одном ОУ.....	467
A.13. Двойной интегратор.....	468
A.14. Дифференциальный интегратор.....	469
A.15. Интегратор переменных сигналов	469
A.16. Суммирующий интегратор	470
A.17. Инвертирующий дифференциатор	470
A.18. Инвертирующий дифференциатор с фильтром шумов	471
A.19. Суммирующий дифференциатор.....	472
A.20. Базовая схема генератора Вина.....	472
A.21. Генератор с мостом Вина и нелинейной ОС	473

A.22. Генератор с мостом Вина и АРУ	474
A.23. Квадратурный генератор	475
A.24. Классический генератор на фазосдвигающих цепочках.....	476
A.25. Генератор с фазосдвигающими цепями и буферами	477
A.26. Генератор Бубба.....	478
A.27. Генераторы треугольных импульсов.....	479
A.28. Атенюаторы	479
A.29. Модель индуктивности.....	481
A.30. Полосовые и режекторные фильтры на ОУ с Т-образными цепями	483
A.31. Генератор постоянного тока	485
A.32. Инвертор опорного напряжения	485
A.33. Усилитель мощности	486
A.34. Схема получения абсолютного значения сигнала	487
A.35. Пиковый детектор.....	487
A.36. Прецизионный выпрямитель.....	488
A.37. Преобразователь переменного напряжения в постоянное.....	488
A.38. Двухполупериодный выпрямитель	489
A.39. Регулятор тембра	489
A.40. Фильтры для подбора АЧХ.....	491
Литература	493

Приложение Б

СОГЛАСОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПО ВХОДУ.....	494
Б.1. Введение	494
Б.2. Согласование дифференциального усилителя	496
Б.3. Инвертирующий канал	497
Б.4. Неинвертирующий канал	498
Б.5. Дифференциальное выходное напряжение	499
Б.6. Результаты испытаний.....	500
Б.6.1. Коэффициент усиления 0.5.....	500
Б.6.2. Коэффициент усиления 1	501
Предметный указатель	502