



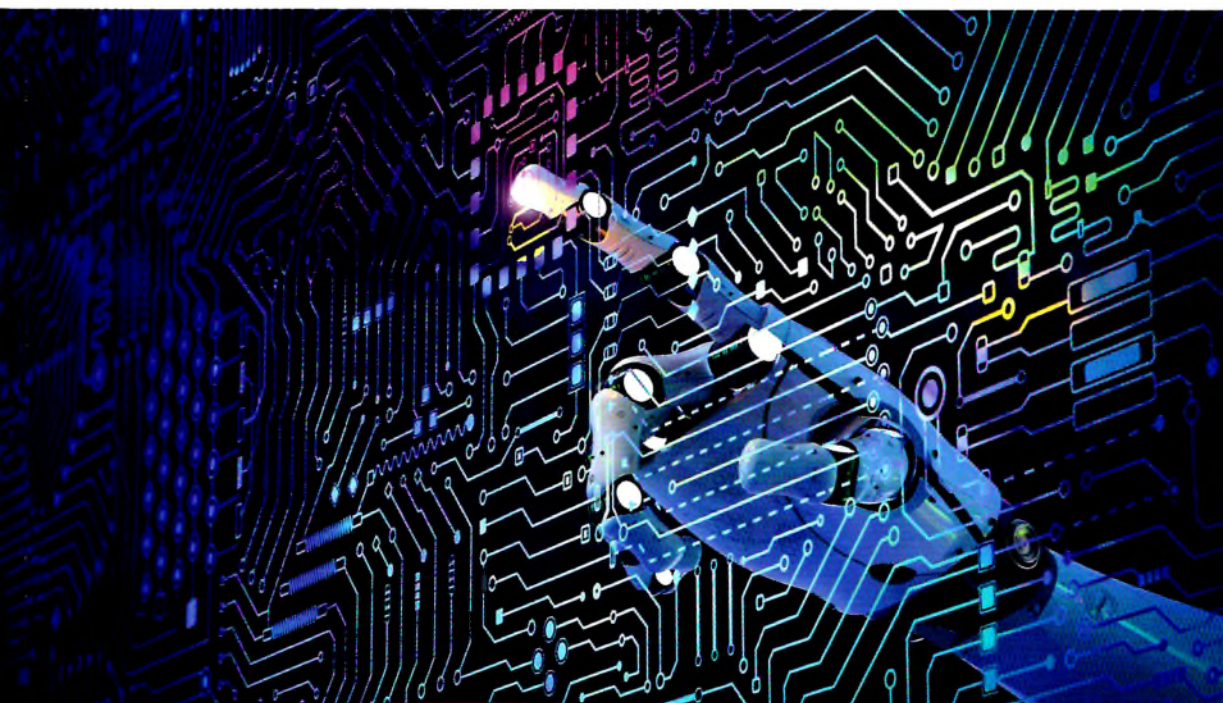
НИТ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

СХЕМОТЕХНИКА

С QR-кодами для перехода
к необходимым ресурсам

Гаврилов С.А. Бартош А.И.

ОТ АЗОВ
ДО СОЗДАНИЯ
практических
устройств



nit.com.ru

Лучшая книга для начинающего разработчика и не только...

- Секреты построения и анализа электронных схем
- Принцип действия электронных устройств, построенных на транзисторах, лампах, микросхемах, микроконтроллерах
- От копирования до создания собственных конструкций
- Разбор ошибок и заблуждений из практики разработчиков

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	15
Часть I. Осваиваем азы схемотехники	17
Шаг 1. Транзисторы биполярные и полевые	19
1.1. Транзисторы и их модели	20
Характеристики транзисторов	20
Биполярный транзистор	21
Крутизна прямой передачи	23
«Линейный участок» или иллюзия?	24
Коэффициент передачи тока базы	24
Германиевые транзисторы	25
Полевые транзисторы	25
Крутизна полевого транзистора	27
1.2. Стабилизация режима	28
Стабилизация тока коллектора	28
«Паспортный режим»	28
Эмиттерная стабилизация	30
Коллекторная стабилизация	31
Делитель напряжения	32
«Токовое зеркало»	32
1.3. Режимы полевых транзисторов	33
Стабилизация тока стока	33
Принудительная стабилизация	33
Всегда ли стабилизировать ток?	34
1.4. Вопросы из практики	35
1.5. Анализ. Что влияет на стабильность	38
Дрейф входного напряжения	38
Нестабильность потенциала базы	38
Трансформированное сопротивление	39
Ток утечки	39
Особенности коллекторной стабилизации	41
Стабилизация схемы с делением напряжения	41
Вспомогательный ток	42
Компенсация дрейфа	42
«Сверхстабильность»	44
Шаг 2. Линейные каскады для слабых сигналов	45
2.1. Обратная связь в линейных каскадах	46
Исходные предпосылки	46
Эмиттерный повторитель	47
Выходное сопротивление	48
Преобразователь напряжения в ток	49
Преобразователь тока в напряжение	51
Преобразователь тока в ток	52
Сложение токов	53

Масштабный усилитель	54
2.2. Анализ эмиттерного повторителя	55
Входное сопротивление	55
«Трансформатор сопротивлений»	56
2.3. «Обычные» линейные каскады	57
Коэффициент передачи	57
Входное сопротивление	58
Выходное сопротивление	58
Ошибка с емкостью	59
2.4. Дифференциальные схемы	61
Дифференциальный преобразователь напряжения в ток	61
Обеспечение режима	62
Максимальное усиление	62
Балансная схема	62
Разбаланс дифференциальной схемы	63
Синфазное напряжение	64
2.5. Вопросы из практики	65
2.6. Дополнение для любознательных	67
Динамическая нагрузка	67
Динамическая нагрузка в дифференциальном каскаде	68
Положительная обратная связь	69

Шаг 3. Линейные каскады на высоких частотах 71

3.1. Необычные свойства обычных схем	72
Неудачный усилитель	72
Емкость нагрузки	72
Емкость база-эмиттер	75
Сюрприз с входной емкостью	76
3.2. Схемотехника широкополосных каскадов	77
Широкополосные схемы	77
Паразитная обратная связь	78
Каскодный усилитель	78
Дифференциальный усилитель	79
Повторитель напряжения	79
Преобразователь тока в напряжение	80
К подсчетам емкостей каскада	80
К подсчетам входного сопротивления	81
«Граничные частоты»	81
3.3. Схемотехника резонансных каскадов	82
Вносимое затухание	82
Самовозбуждение резонансного усилителя	83
Неполная связь	84
Параллельное включение	85
Последовательное включение по входу	86
Последовательное включение по выходу	86
3.4. Вопросы из практики	87
3.5. Дополнение для любознательных	89
Сопряжение моделей	89
Отрицательное сопротивление	90

Шаг 4. Линейные каскады при больших сигналах	91
4.1. Уровни напряжений	92
Проблемы выбора режимов	92
Резистивная нагрузка в коллекторе	92
Потенциал коллектора	93
Без ООС	94
Резистивная нагрузка в эмиттере	96
4.2. Схемы с внешней нагрузкой.	97
Куда делся динамический диапазон?	97
Не повторяющий повторитель	98
Фундаментальное условие	99
Трансформаторные каскады	100
4.3. Дополнение для любознательных.	101
Вольдобавка	101
Реактивная нагрузка	102
Емкость нагрузки	103
Реактивный ток	103
Параллельная индуктивность	104
Двухтактные структуры	104
4.4. Электронная регулировка уровня	105
Управление крутизной усилителя	105
Диапазон регулирования	106
«Вариант АРУ»	107
Секрет формы характеристики	108
Многокаскадное регулирование	108
«Вариант РРУ»	109
Управление распределением токов	109
Управляемый аттенюатор	111
4.5. Вопросы из практики	113
Шаг 5. Полупроводниковые ключи	117
5.1. Ключ напряжения	118
Схемы автоматики и коммутации	118
Ключи напряжения	118
Управление ключом напряжения	119
Кремниевые и германиевые транзисторы	120
Преобразование уровней	121
Полевые ключи	125
Двухполярный ключ	125
«Сквозной» ток	126
5.2. Ключ тока	127
Коммутация тока	127
Управление ключом тока	127
Диодные ключи	128
Ответвление тока	128
5.3. Дополнение для любознательных.	129
Импульсные схемы	129
Причуды разделительной емкости	130
Аналоговые ключи	131

Ключ структуры МОП.	132
Аналоговый мультиплексор.	132
5.4. Вопросы из практики.	133
5.5. Анализ. Точность и быстродействие.	135
Напряжение на открытом ключе.	135
Первая составляющая. Остаточное напряжение.	135
Вторая составляющая. Падение напряжения.	136
Третья составляющая. Сопротивление коллектора.	136
Скорость переключения.	137
Барьерная емкость.	137
Время включения.	138
Время рассасывания.	140
Перезаряд емкости нагрузки.	143
Идеальные фронты.	144
Ключ тока.	144
Точность передачи аналоговых ключей.	144
Скорость переключения.	145
Сопротивление в цепи затвора.	145
Шаг 6. Нелинейные каскады.	147
6.1. Амплитудное детектирование.	148
Диодный детектор.	148
Хитрости смещенного диода.	148
Параллельный детектор.	149
Детектор «с удвоением».	150
Эмиттерный детектор.	151
«Линейный» и «квадратичный» детекторы.	152
6.2. Анализ: мнимо-простой диодный детектор.	153
Искажения в детекторе.	153
Полоса модулирующих частот.	154
Путаница с «входным сопротивлением».	155
«Обратное сопротивление».	156
Чувствительность детектора.	157
Истоковый детектор.	159
6.3. Перемножение колебаний.	160
Перемножители и смесители.	160
Крутизна преобразования.	160
Амплитуда колебаний гетеродина.	161
Закон управления.	161
Сложение колебаний.	162
Каскад с развязкой.	163
Страховка от неточности.	165
«Сильный» сигнал.	166
Балансный смеситель.	166
Ключевые смесители.	166
6.4. Анализ. Амплитудное ограничение.	169
Дифференциальный ограничитель.	169
Апертура ограничения.	170
Парадокс входного сопротивления.	170

6.5. LC-генераторы	171
Баланс амплитуд.	171
Насыщение транзистора	172
Автоматическое смещение.	173
Ограничение в петле	174
Снова дифференциальный ограничитель.	174
Две цепи обратной связи.	175
6.6. Кварцевая стабилизация частоты	177
Кварцевый резонатор	177
Параллельный резонанс	177
Последовательный резонанс.	178
Низкоомный вход и выход.	178
Универсальная дифференциальная схема	179
Мощность, рассеиваемая кварцем	180
6.7. Вопросы из практики	180
6.8. Дополнение для любознательных.	182
Обращение схем	182
Детектор тока	182
Управление по подложке	184
Четырехквadrантный перемножитель.	185
Смеситель с управляемым сопротивлением.	185

Шаг 7. От многотранзисторных схемных структур к операционным усилителям

	187
7.1. Самостабилизирующиеся схемы	188
Обратная связь по режиму.	188
Транзисторное кольцо.	188
Пути для токов	190
Главный секрет	191
Слабое звено.	192
7.2. Стабилизация сигнальных параметров	193
Общая ООС по сигналам.	193
Усилитель постоянного тока.	193
Повторитель напряжения	195
Масштабный усилитель.	195
Преобразователь тока в напряжение.	195
Смещение нуля	196
Усилитель переменного напряжения	197
Операционные усилители	197
7.3. Измерительные схемы	199
Обходимся без операционного усилителя	199
Напряжение ошибки	200
Компенсирующий транзистор	200
Согласование режима пары.	202
7.4. Диапазон уровней.	203
Шкалы уровней.	203
Проблема синфазного напряжения	203
Уровни выхода	204
Сдвиг уровня	205

Балластный ток	206
Ток нагрузки	206
Двухполярные каскады	207
7.5. Вопросы из практики	207
7.6. Дополнение для любознательных	210
Стабилизированный усилитель	210
Разрабатываем интегральную схему	211
Физический эталон	211
Шаг 8. Анализ многотранзисторных схем с ООС	213
8.1. Точность измерительных схем	214
Показатели качества	214
Анализ напряжения ошибки	215
Разброс коллекторных резисторов	216
Различие коллекторных напряжений	216
Ответвление тока	217
Парадокс «выходного сопротивления»	217
8.2. Устойчивость схем с ООС	219
Комплексный коэффициент передачи тока	219
Потенциальная неустойчивость	221
Реальная неустойчивость	222
Предельная частота усиления по току	223
Звено первого порядка	223
Виртуальный транзистор	224
8.3. Частотные свойства схем	225
Типичные ошибки	225
Звено с ограничением	226
Низкочастотный выходной транзистор	227
Температура и предельная частота	228
По страницам старых журналов	229
Схемы с коррекцией	230
Мифы «полосы пропускания»	230
8.4. Динамические свойства схем	231
Скорость нарастания	231
Заряд емкости нагрузки	231
Разряд емкости нагрузки	233
Быстродействие выходного транзистора	234
Бросок тока нагрузки	236
8.5. Аналоговая стабилизация напряжения	236
Создаем стабилизатор	236
Сетевой выпрямитель	237
Коэффициент полезного действия	239
Опорное напряжение	239
Стабильность опоры	240
Дрейф напряжения ошибки	243
Уровень пульсаций	243
Коммутация нагрузки	245
8.6. Вопросы из практики	246

Шаг 9. Многокаскадные аналоговые схемы	249
9.1. Совместимость по информации	250
Система и подсистемы	250
«Согласование» каскадов	251
Информационные электрические величины	252
Связь напряжение-напряжение	252
Связь ток-ток	254
Связи напряжение-ток и ток-напряжение	255
Разветвления	256
Объединения	257
9.2. Неконтролируемые связи в схемах	258
Самовозбуждение усилителей	258
Паразитные параметры общих шин	259
Конструкции общих шин	261
Защищенные междукаскадные связи	262
Связь напряжение-напряжение	263
Индуктивная междукаскадная связь	264
Чередование структур	265
«Токовое зеркало»	265
Дифференциальный усилитель	266
Путаница с развязкой	266
Связь ток-ток	268
Цепи задания режима	269
9.3. Вопросы из практики	270
9.4. Дополнение для любознательных	272
Согласование по шумам	272
Шум биполярного транзистора	273
Шаг 10. Надежность полупроводниковых схем	275
10.1. Надежность электрического режима	276
Мнимые отказы	276
Ошибка в справочнике?	276
Лавинный пробой	276
Граничное напряжение	278
Напряжение переворота фазы	278
Питание базы фиксированным током	279
Конечное сопротивление в цепи базы	279
Сопротивление в цепи эмиттера	280
Сопротивление в цепях базы и эмиттера	281
Схема Дарлингтона	281
Каскадное включение	282
10.2. Тепловая устойчивость аналоговых схем	283
Тепловые токи	283
Вытеснение тока базы	284
Балластный ток	285
10.3. Разбор ошибок	286

Шаг 9. Многокаскадные аналоговые схемы 249

9.1. Совместимость по информации.	250
Система и подсистемы	250
«Согласование» каскадов.	251
Информационные электрические величины	252
Связь напряжение-напряжение	252
Связь ток-ток	254
Связи напряжение-ток и ток-напряжение.	255
Разветвления.	256
Объединения.	257
9.2. Неконтролируемые связи в схемах	258
Самовозбуждение усилителей	258
Паразитные параметры общих шин.	259
Конструкции общих шин.	261
Защищенные междукаскадные связи	262
Связь напряжение-напряжение	263
Индуктивная междукаскадная связь	264
Чередование структур.	265
«Токовое зеркало».	265
Дифференциальный усилитель.	266
Путаница с развязкой	266
Связь ток-ток	268
Цепи задания режима.	269
9.3. Вопросы из практики.	270
9.4. Дополнение для любознательных.	272
Согласование по шумам	272
Шум биполярного транзистора	273

Шаг 10. Надежность полупроводниковых схем 275

10.1. Надежность электрического режима	276
Мнимые отказы.	276
Ошибка в справочнике?	276
Лавинный пробой	276
Граничное напряжение	278
Напряжение переворота фазы	278
Питание базы фиксированным током	279
Конечное сопротивление в цепи базы	279
Сопротивление в цепи эмиттера.	280
Сопротивление в цепях базы и эмиттера	281
Схема Дарлингтона	281
Каскодное включение.	282
10.2. Тепловая устойчивость аналоговых схем	283
Тепловые токи	283
Вытеснение тока базы.	284
Балластный ток	285
10.3. Разбор ошибок	286

Часть II. От азов до практических устройств на электронных лампах.	293
Шаг 11. Интересны ли нам радиолампы?	295
11.1. Музыка из ящика	296
Лампы и звук.	296
Не слишком ли плохи параметры?	297
Что такое динамический диапазон	297
11.2. О высоком качестве звучания	298
Высокая верность.	298
«Транзисторный звук» — реальность или миф?	299
Никаких компромиссов.	301
Last but not least.	301
Шаг 12. Приемно-усилительные лампы	303
12.1. Ламповый триод и его свойства	304
Рассматриваем вольтамперные характеристики.	304
Режимы триода и рабочая точка.	305
Ток сетки и утечка сетки	306
Статические параметры лампы	306
О номинальных и реальных значениях.	307
«Левые» и «правые»	308
Анодные характеристики	309
Анодная нагрузка.	309
12.2. Сеток становится больше	309
Анод и «как бы анод»	309
Триодная часть тетрода.	310
Вторая сетка и токраспределение	311
Появляется третья сетка	313
Лампы с двойным управлением	314
Лучевые тетроды	314
«Варимю» или «варизэс»?	315
12.3. Режимы, и как их устанавливать	316
А какой режим нужен?	316
Фиксированное, и не самое лучшее.	317
Катодное смещение — это просто.	318
Минус на сетку? Нет плюс!.	319
Новость: анодная стабилизация	320
А что с режимом пентода?	321
Сюрприз: принудительная стабилизация	321
Как выбирать резисторы утечки	322
Диод в триоде.	322
Проблемы с трансформаторной связью	323
Низкое анодное напряжение возможно?	324
Шаг 13. Работаем с малыми сигналами	325
13.1. Строим усилительные каскады	326
Триодный усилитель — это несложно.	326
Ближе к практике.	327

Пентодный усилитель – это еще проще	327
Пытаемся увеличить усиление	328
Вводим отрицательную обратную связь	329
Динамическая крутизна и мнимая ООС	330
Преобразование напряжения в ток	331
Дифференциальный и синфазный сигнал	332
Катодный повторитель в реальности и в мифах	332
Пентодный повторитель или повторитель на пентоде?	334
Преобразование тока в напряжение	334
«Заземленная сетка»	335
Занимательная схемотехника	336
13.2. Выше частота – сложнее проблемы	337
Паразитные емкости лампы	337
Постоянная времени нагрузки	338
Неприятности с входным сопротивлением и емкостью	338
Не пентодом единым	340
Нейтродины	340
Неполное включение	341
Каскодная и дифференциальная схемы	342
Катодный повторитель подкладывает свинью	343
13.3. Помехи, и как с ними бороться	344
Снова проблема неконтролируемых связей	344
Развязка правильная и неправильная	345
Дифференциальный усилитель снова выручает	346
Индуктивная (трансформаторная) межкаскадная связь	347
Приведение помехи к сетке	348
Лучше антенна – хуже прием?	348
Планета Земля и просто «земля»	349

Шаг 14. Создаем ЛАМПОВЫЙ аудиоусилитель **351**

14.1. Предварительное аудиоусиление	352
Режим класса А	352
Резистивный драйвер и проблемы неискаженной передачи	352
Строим нагрузочную прямую	353
«Клирфактор»	354
Знакомимся с динамической характеристикой	354
Внешняя нагрузка	355
... и перегрузка!	356
Трансформаторы и дросселив драйвере	357
Динамическая нагрузка и мода	359
Необычный катодный повторитель	360
Положительная обратная связь?	361
14.2. Классика тетродных усилителей мощности	362
Рассматриваем энергетику для режима А	362
Нужно ли «согласование» с нагрузкой?	363
Остаточное напряжение оконечной лампы	364
Рассчитываем мощность в нагрузке	365
Допустимые значения напряжений и токов	366
Выходное сопротивление и демпфирование	366
Параллельное включение ламп	367

Нужен ли «антипаразитный» резистор?	368
Катодный повторитель и реактивный ток	368
Зачем параллельный конденсатор?	369
14.3. Проблемы триодных оконечных каскадов	370
Проблема остаточного напряжения	370
Работаем с токами сетки	372
Высокое анодное напряжение	373
Триоды с редкой сеткой	373
Проблема реактивного тока	374
Триодные характеристики строим сами	375
Прямой накал: элита или миф?	376
14.4. Двухтактное усиление на перекрестке мнений	376
Плюсы или минусы двухтактника	376
Режимы А, В и АВ	377
Фазоинверторы	378
Сюрприз: самоинвертирующие каскады	379
14.5. Транзисторный звук в ламповых схемах	380
Чудеса отменяются	380
Сильная и слабая ООС	380
Откуда берется мягкое и жесткое ограничение	382
Необычная проблема частотных границ	383
Легенды и мифы выходного сопротивления	384
Шаг 15. Поговорим о радиоприемниках	385
15.1. Избирательные системы	386
Необходимое объяснение	386
Синхронный прием – решение для профи	386
Супергетеродинный прием или прямое усиление	387
Колебательный контур – знакомый незнакомец	388
Полоса пропускания	389
Подавление внеполосных сигналов	389
Связанные контуры	391
Гауссов тракт – что это?	392
15.2. Прием нормальный и паразитный	393
Какие бывают каналы паразитного приема	393
Зеркальный канал и борьба с ним	394
Увеличивать ПЧ или добавлять контур?	395
Приемники с задиапазонной ПЧ	396
Помеха с промежуточной частотой	397
Помехи на гармониках гетеродина	398
Забитие. Кросс-модуляция	398
Двойное преобразование. Пораженные частоты	401
«Режекторно-интегральный формирователь»	401
15.3. Автоматическая регулировка усиления	402
Проблема № 1: регулирующий элемент	402
Так для чего нужны пентоды «К»?	403
«Гениальные» идеи и их фиаско	404
Новость: управление токораспределением	405
Проблема № 2: петля регулирования	405
Для чего столько ламп?	406

15.4. Вспомним о диодах	407
Амплитудный детектор на ламповом диоде.	407
Искажения в ламповом детекторе	407
Рассчитываем чувствительность детектора	409
Переходим к параллельному детектору	409
Сеточный детектор – услада радиолюбителя	410
Секрет регенератора	411
Катодный детектор, пасынок радиолюбителя	412
Анодный детектор, пережиток старины.	412
Кенотронный выпрямитель	413
Часть III. Практика: создаем устройства на цифровых и аналоговых микросхемах.	415
Шаг 16. Интегральные микросхемы – что это, для чего и как?	417
16.1. Что такое микросхема?	418
О чем нам говорят даташиты.	418
Без настройки схем на дискретных элементах – не обойтись.	419
Пошаговый путь к созданию микросхемы	421
Как устроена микросхема	422
16.2. Преимущество и недостатки использования ИМС	425
Начнем с преимуществ	425
Несколько слов о недостатках микросхем.	426
16.3. Виды сигналов – аналоговый и цифровой.	427
Аналоговый сигнал	427
Дискретный сигнал	429
Цифровой сигнал	432
Шаг 17. Аналоговые микросхемы: создаем практические устройства.	437
17.1. Микросхемы для преобразования аналогового сигнала в цифровой: практика	438
555 – никакого оккультизма, просто интегральная микросхема-таймер	438
Назначение выводов и внутреннее устройство.	439
Принцип работы.	442
Моностабильный мультивибратор или одновибратор.	443
Хлопковый выключатель.	447
Астабильный мультивибратор	447
Генератор с точной настройкой коэффициента заполнения	450
ШИМ-регулятор на микросхеме NE555.	451
17.2. Линейные стабилизаторы напряжения	454
Что такое линейный стабилизатор?	454
Как работают чудо-стабилизаторы.	457
Основные характеристики.	458
Регулируемые линейные стабилизаторы напряжения	459
Стабилизатор тока	464
LDO-стабилизаторы.	465

17.3. Устройства на интегральных операционных усилителях	466
Определение и виды операционных усилителей	466
Основные характеристики ОУ	471
Включение ОУ по схеме неинвертирующего усилителя	472
Включение ОУ по схеме инвертирующего усилителя	473
Включение ОУ по схеме повторителя напряжения	473
Включение ОУ по схеме усилителя тока	475
Примеры устройств, которые можно сделать на операционных усилителях	475
Фотореле или «сумеречный выключатель» на ОУ	476
Предусилитель для «компьютерного» микрофона	478
Лабораторный блок питания	480
Ретранслятор для пульта дистанционного управления	482
Приставка «Овердрайв» для гитары и других музыкальных инструментов	483
Предварительный усилитель с темброблоком	486
17.4. Микросхемы усилителей звука	489
Создаем усилитель для колонок	489
Простой УМЗЧ на TDA1552	491
Усилитель с кнопочным управлением для носимой аппаратуры.	495
Трехканальный стереофонический усилитель для ПК	496
УНЧ с псевдоквадрофоническим эффектом и темброблоком	499
Включение интегрального УНЧ по мостовой схеме	502
Шаг 18. Цифровые микросхемы: создаем практические устройства	505
18.1. Виды и особенности цифровых микросхем	506
Какие бывают цифровые ИМС и чем они отличаются друг от друга	506
Основные сокращения в описании сигналов	507
Разбираемся в маркировках и сериях микросхем	509
18.2. Практические конструкции на цифровых микросхемах	511
От механических переключателей к электронным	511
Кнопка-выключатель с фиксацией	511
Переключатель с зависимой фиксацией	513
Приоритетный переключатель с зависимой фиксацией	514
Задающий генератор для двухтактного инвертора	516
Игра «Кто быстрее»	518
Приложение. Перечень условных обозначений элементов в схемах	521
Литература	527