

П. Хоровиц, У. Хилл

# Искусство схемотехники

Часть первая  
Аналоговая

3-е издание

Перевод с английского



Москва  
Издательство БИНОМ  
2024

УДК 681.3–621.375  
БК 32.85  
Х80

**Хоровиц П., Хилл У.**

**Х80 Искусство схемотехники, 3-е издание.** Часть первая. Аналоговая: Перевод с англ. — М.: Издательство БИНОМ. — 2024. — 728 с., ил.

**ISBN 978-5-6050725-1-5**

Читатель держит в руках долгожданное, полностью пересмотренное, видоизмененное и обогащенное новыми знаниями третье (и последнее, учитывая возраст авторов) издание невероятно успешного и авторитетного «Искусства схемотехники». Это учебник, справочник и руководство («в одном флаконе») по разработке электронных схем, проданное повсеместно на восьми языках тиражом более миллиона экземпляров. Искусство схемотехники растолковывается авторами как сплав законов, эмпирических правил и далекого от математики интуитивного представления о силах, движущих собранную электрическую схему.

Предназначено всем, неравнодушным к электротехнике во всех смыслах ее бытия.

**Пауль Хоровиц** (*Paul Horowitz*), профессор Гарвардского университета, в далеком 1974 г. принял участие в создании *Laboratory Electronics* и соответствующего учебного курса, что способствовало и появлению первого издания «Искусства схемотехники». Его исследовательский интерес связан с астрофизикой, рентгеноскопией, микроскопией, оптической интерферометрией. Он автор более 200 научных работ, эксперт и консультант промышленных и правительственных структур, разработчик несчетного количества исследовательских методик и обслуживающих их электронных приборов. Причастен к вызывающей полемику программе поиска внеземного разума.

**Уинфилд Хилл** (*Winfield Hill*) — воплощенный гуру схемотехники. Прошел сквозь выпускную программу по физической химии Гарварда, обрел диплом инженера-электрика, начал свой карьерный рост в *Harvard's Electronics Design Center*. После 7 лет освоения электроники устроился на работу в *Sea Data Corporation* и 16 лет создавал инструментарий для физической океанографии. В 1988 г. рекрутировался в *Rowland Institute for Science* (впоследствии подразделение Гарварда). В должности руководителя *Electronics Engineering Laboratory* разработал свыше 500 образцов электронного оборудования. Интересуется высоковольтным (до 15 кВ) радиочастотным оборудованием, сильноточной (до 1200 А) импульсной электроникой, малошумящей (до нВ и пА) усилительной техникой, импульсными МОП-генераторами.

#### **Перевод с английского выполнен силами**

\* Издательства МИР

\* Издательства БИНОМ

\* В. П. Солдатова (главы 4, 5, 6)

\* Пожелавших остаться неназванными представителей

экспертного сообщества схемотехников (глава 8, фрагменты разных глав)

#### **Издательство признательно**

сотруднику ЗАО НПФ «Доломант» Сергею Владимировичу Турубарову

и сотруднику кафедры Микроэлектроники НИЯУ МИФИ канд. тех. наук Юрию Ивановичу Бочарову

за редактирование отдельных глав книги

**Оформление обложки** М. В. Пясецкой

**ISBN 978-0-521-80926-9** (англ.)

**ISBN 978-5-6050725-1-5** (русск.)

© Cambridge University Press. The Art of Electronics, Ed. 3, 2015

© Издательство БИНОМ, 2016

# ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ

«Искусство схемотехники» Хоровица и Хилла — книга легендарная. Скорость развития технологий сильно опережает скорость обновления книжного фонда, но фундаментальные основы схемотехники неизменны. В новом издании часть книги значительно переработана с учетом колоссальных успехов индустрии за время, прошедшее с прошлой публикации. Книга подойдет тем, кто только входит в специальность, а также действующим специалистам, углубляющим знания и навыки. Переводчики максимально емко и эффективно передали содержание работы, стараясь сохранить дух и подачу автора.

Существует достаточно большой разрыв сложности между любительским уровнем проектирования схемотехнических решений и профессиональным. Хоровиц и Хилл помогают разрыв преодолеть. Для эффективного изучения материала книги стоит следовать следующим правилам: изучать материал небольшими порциями, сразу закреплять изученный материал практикой в системах проектирования и моделирования в SPICE-системах и других продуктах, а также изготавливать тестовые устройства и приборы с помощью макетных и печатных плат, исследуя уже существующие электрические схемы. При проектировании рекомендую следовать правилу золотого стандарта: при развитии системы менять только один компонент. Такой подход позволит отследить ошибки наиболее эффективным способом. Подобным образом я учу своих студентов. Для облегчения расчетной части важно иметь хорошую подготовку в математике и физике. При разработке и эксплуатации электрических схем необходимо понимать, что вы имеете дело с реальными объектами и помимо схемотехники важно изучать особенности технологии и производства, что впоследствии поможет обнаружить причины неочевидных дефектов и неисправности; таким образом мой научный руководитель нашел причину брака в партии

печатных плат. Как оказалось, партия была неисправна, потому что на одном из этапов производства не была смыта кислота, замыкавшая контакты.

При изучении книги необходимо помнить, что предлагаемая авторами компонентная база является зарубежной; используя знания в области отечественной компонентной базы, необходимо приложить дополнительные усилия по адаптации и учету характеристик, а также стандартов в области разработки и эксплуатации. При заказе компонентов помните, что доставку часто задерживают, переносят, а порой и вовсе отменяют поставщики. Поэтому наберитесь терпения и обязательно резервируйте ваши закупки.

Необходимо быть готовым к тому, что «успешный успех» придет не сразу, но как результат поступательного и непростого пути разработчика. Если ваша разработка уперлась в тупик, необходимо обратиться к преподавателям, коллегам, экспертному сообществу и не бояться задавать глупые вопросы и даже просто обсуждать и искать бытовые аналогии. Одной из наиболее распространенных причин неполадок является отсоединившийся контакт, и поиск неисправностей необходимо начинать именно с отсутствующего или закороченного контакта.

Напоследок невысказанная мысль от Х. и Х. Необходимым качеством инженера-разработчика является чувство юмора. Именно оно способствует принятию наилучших решений, позволяя раз за разом переделывать и улучшать ваше устройство, разряжать атмосферу в коллективе, а при необходимости и заряд статического электричества.

*Ю. Р. Шалтаева, старший преподаватель кафедры  
N27 (Микро- и нанoeлектроника) НИЯУ МИФИ*

# СОДЕРЖАНИЕ

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЧАСТИ 2 (ЦИФРОВОЙ)

### ПРЕДИСЛОВИЯ

### ПЕРЕД ТЕМ КАК ЧИТАТЬ. ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

## 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ 1

1.1. Введение	1
1.2. Напряжение, ток и сопротивление	1
1.2.1. Напряжение и ток	1
1.2.2. Резисторы: взаимосвязь между напряжением и током	3
1.2.3. Делители напряжения	7
1.2.4. Источники тока и напряжения	7
1.2.5. Схема эквивалентного преобразования источников (генераторов)	9
1.2.6. Динамическое сопротивление	12
1.2.7. Пример. «Здесь слишком жарко!»	13
1.3. Сигналы	13
1.3.1. Синусоидальные сигналы	13
1.3.2. Амплитуда сигналов. Децибелы	14
1.3.3. Другие типы сигналов	15
1.3.4. Логические уровни	16
1.3.5. Источники сигналов	16
1.4. Конденсаторы и цепи переменного тока	17
1.4.1. Конденсаторы	17
1.4.2. <i>RC</i> -цепи: изменение тока и напряжения во времени	20
1.4.3. Дифференцирующие цепи	23
1.4.4. Интегрирующие цепи	24
1.4.5. Не «само совершенство»	25
1.5. Индуктивности и трансформаторы	26
1.5.1. Индуктивности	26
1.5.2. Трансформаторы	27
1.6. Диоды и диодные схемы	28
1.6.1. Диоды	28
1.6.2. Выпрямление	29
1.6.3. Фильтрация в источниках питания	29
1.6.4. Схемы выпрямителей для источников питания	30
1.6.5. Стабилизаторы напряжения	32
1.6.6. Примеры использования диодов	32
1.6.7. Индуктивные нагрузки и диодная защита	35
1.6.8. Интерлюдия. Наши друзья — катушки индуктивности	36
1.7. Полное и реактивное сопротивление	37
1.7.1. Частотный анализ реактивных схем	38
1.7.2. Реактивность катушки индуктивности	40

1.7.3. Определение напряжения и тока с помощью комплексных чисел	40
1.7.4. Реактивное сопротивление конденсаторов и индуктивностей	41
1.7.5. Обобщенный закон Ома	41
1.7.6. Мощность в реактивных схемах	42
1.7.7. Делители напряжения. Обобщение	43
1.7.8. Высокочастотные <i>RC</i> -фильтры	43
1.7.9. Низкочастотные <i>RC</i> -фильтры	44
1.7.10. Частотные характеристики интегрирующих и дифференцирующих <i>RC</i> -цепей	46
1.7.11. Индуктивности против конденсаторов	46
1.7.12. Векторные диаграммы	46
1.7.13. «Полосы», децибелы, октавы	47
1.7.14. Резонансные цепи	47
1.7.15. <i>LC</i> -фильтры	48
1.7.16. Другие примеры использования конденсатора	49
1.7.17. Обобщенная теорема Тевенина	49
1.8. Средневолновое радио	49
1.9. Другие пассивные компоненты	50
1.9.1. Электромеханические компоненты. Переключатели	51
1.9.2. Электромеханические компоненты. Реле	53
1.9.3. Разъемы	53
1.9.4. Индикаторы	56
1.9.5. Переменные компоненты	56
1.10. Последний выстрел. Поражающие воображение маркировки. Невидимые глазом компоненты	58
1.10.1. Технология поверхностного монтажа. Смех и грех	58
Дополнительные упражнения к главе 1	59
Заключительный обзор главы 1	60
<b>2. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ 63</b>	
2.1. Введение	63
2.1.1. Источники тока и напряжения	64
2.2. Некоторые транзисторные схемы	65
2.2.1. Транзисторный переключатель	65
2.2.2. Примеры переключающих цепей	68
2.2.3. Эмиттерный повторитель	71
2.2.4. Эмиттерные повторители в качестве стабилизаторов напряжения	74
2.2.5. Смещение в эмиттерном повторителе	74
2.2.6. Источники тока	77
2.2.7. Усилители с общим эмиттером	79
2.2.8. Схема расщепления фазы с единичным коэффициентом усиления	80

2.2.9. Крутизна характеристики	80	3.4.2. Недостатки ПТ-ключей	157
2.3. Модель Эберса-Молла для основных транзисторных схем	81	3.4.3. Примеры схем на ПТ-ключах	164
2.3.1. Улучшенная модель транзистора: усилитель с передаточной проводимостью (крутизной)	81	3.4.4. Логические МОП-ключи	166
2.3.2. Эмпирические правила разработки схем на основе уравнения Эберса-Молла	82	3.5. Мощные МОП-транзисторы	168
2.3.3. Еще раз об эмиттерном повторителе	83	3.5.1. Высокое сопротивление, температурная стабильность	169
2.3.4. Еще раз об усилителе с общим эмиттером	84	3.5.2. Характеристики мощных МОП-ключей	172
2.3.5. Смещение в усилителе с общим эмиттером	87	3.5.3. Мощные переключатели в логических схемах	173
2.3.6. Шаг в сторону: идеальный транзистор	90	3.5.4. Предосторожности в работе с мощными МОП-ключами	177
2.3.7. Токовые зеркала	91	3.5.5. Сравнение сильноточных ключей на БТ и МОП-транзисторах	181
2.3.8. Дифференциальные усилители	92	3.5.6. Некоторые примеры переключающих схем на мощных МОП-транзисторах	182
2.4. Некоторые типы усилительных каскадов	95	3.5.7. БТ с изолированным затвором и другие мощные полупроводники	186
2.4.1. Двухтактные выходные каскады	96	3.6. МОП-транзисторы в линейных приложениях	187
2.4.2. Составной транзистор (схема Дарлингтона)	98	3.6.1. Высоковольтный пьезоусилитель	188
2.4.3. Слепящая связь	100	3.6.2. Схемы на транзисторах обедненного типа	189
2.4.4. Разделение тока в параллельных БТ	101	3.6.3. Параллельное включение МОП-транзисторов	191
2.4.5. Емкость и эффект Миллера	102	3.6.4. Тепловой разгон	193
2.4.6. Полевые транзисторы	104	Заключительный обзор главы 3	195
2.5. Отрицательная обратная связь	104	<b>4. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ</b>	<b>201</b>
2.5.1. Введение в понятие обратной связи	105	4.1. Введение в операционные усилители как «идеальные компоненты»	201
2.5.2. Уравнение для коэффициента усиления	105	4.1.1. Обратная связь и операционные усилители	202
2.5.3. Влияние ОС на схему усилителя	106	4.1.2. Операционные усилители	202
2.5.4. Еще две существенные детали проблемы	108	4.1.3. Золотые правила для схем с ОУ	203
2.5.5. Примеры транзисторных усилителей с обратной связью	109	4.2. Основные схемы включения ОУ	204
2.6. Некоторые типовые транзисторные схемы	111	4.2.1. Инвертирующий усилитель	204
2.6.1. Стабилизированный источник питания	111	4.2.2. Неинвертирующий усилитель	204
2.6.2. Терморегулятор	111	4.2.3. Повторитель напряжения	205
2.6.3. Простая логическая схема на транзисторах и диодах	112	4.2.4. Дифференциальный (разностный) усилитель	205
Дополнительные упражнения к главе 2	112	4.2.5. Источники тока	206
Заключительный обзор главы 2	114	4.2.6. Интегрирующие усилители (интеграторы)	209
<b>3. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ</b>	<b>119</b>	4.2.7. Основные предостережения при работе с ОУ	210
3.1. Введение	119	4.3. Актуальная галерея полезных схем	211
3.1.1. Характеристики ПТ	119	4.3.1. Линейные схемы	211
3.1.2. Типы ПТ	121	4.3.2. Нелинейные схемы	215
3.1.3. Общие характеристики ПТ	123	4.3.3. ОУ в генераторе пилообразного напряжения	219
3.1.4. Выходные (стоковые) характеристики ПТ	125	4.3.4. Применение ОУ для измерения напряжения отсечки ПТ	219
3.1.5. Производственный разброс характеристик ПТ	126	4.3.5. Генератор импульсов программируемой длительности	221
3.1.6. Основные схемы на ПТ	127	4.3.6. Активный фильтр нижних частот	222
3.2. Линейные схемы на полевых транзисторах	128	4.4. Подробный обзор характеристик ОУ	222
3.2.1. Краткая презентация ПТ с <i>pn</i> -переходом	128	4.4.1. Отличия характеристик идеальных и неидеальных ОУ	223
3.2.2. Источники тока на ПТ с <i>pn</i> -переходом	129	4.4.2. Влияние ограничений ОУ на работу схем	229
3.2.3. Усилители на ПТ	133	4.4.3. Пример. Чувствительный милливольтметр	233
3.2.4. Дифференциальные усилители	138	4.4.4. Полоса усиления и источник тока на ОУ	234
3.2.5. Генераторы	141	4.5. Детальный взгляд на избранные схемы	234
3.2.6. Истоковые повторители	141	4.5.1. Активный пиковый детектор	234
3.2.7. ПТ в качестве переменного резистора	146	4.5.2. Выборка и запоминание	236
3.2.8. Ток затвора ПТ	147	4.5.3. Активный ограничитель	236
3.3. Пристальный взгляд на ПТ	149	4.5.4. Схема выделения модуля абсолютного значения сигнала	236
3.3.1. Зависимость тока стока от напряжения на затворе	150	4.5.5. Возвращаясь к схеме интегратора	238
3.3.2. Ток стока и напряжение сток-исток: выходная крутизна	151	4.5.6. Схемная компенсация утечки ПТ	239
3.3.3. Крутизна и ток стока	151	4.5.7. Дифференциаторы	241
3.3.4. Крутизна как функция напряжения стока	153	4.6. Работа ОУ при однополярном питании	241
3.3.5. Емкостные характеристики ПТ	153	4.6.1. Усилители переменного тока с одним источником питания	241
3.3.6. Почему ПТ с <i>pn</i> -переходом (но не МОП-транзисторы) в усилителях?	154		
3.4. Ключи на полевых транзисторах	154		
3.4.1. Аналоговые ключи на ПТ	155		

4.6.2. Емкостные нагрузки	244	5.9.1. Проблемы входных каскадов	299
4.6.3. Операционные усилители с одним источником питания	245	5.9.2. Проблемы выходных каскадов	300
4.6.4. Пример. Генератор, управляемый напряжением	247	5.10. Выбор прецизионного ОУ	302
4.6.5. Изготовление генератора, управляемого напряжением: сверление vs поверхностный монтаж	249	5.10.1. Семь прецизионных ОУ	303
4.6.6. Детектор нуля	250	5.10.2. Количество в корпусе	303
4.6.7. Сводная таблица параметров ОУ	251	5.10.3. Напряжение питания, диапазон сигнала	303
4.7. Другие типы усилителей и ОУ	251	5.10.4. Работа при однополярном питании	307
4.8. Некоторые типовые схемы с использованием ОУ	254	5.10.5. Напряжение смещения	307
4.8.1. Лабораторный усилитель общего назначения	254	5.10.6. Шум напряжения	308
4.8.2. Детектор залипших узлов	257	5.10.7. Ток смещения	309
4.8.3. Схема измерения тока нагрузки	258	5.10.8. Токовый шум	311
4.8.4. Интегрирующий монитор загара	259	5.10.9. КОСС и КОНП	312
4.9. Частотная коррекция усилителей с обратной связью	262	5.10.10. Полоса усиления, частота единичного усиления, скорость нарастания, параметр $m$ , время установления	313
4.9.1. Зависимость коэффициента усиления и фазового сдвига от частоты	262	5.10.11. Искажения	314
4.9.2. Методы коррекции усилителей	263	5.10.12. Совершенный ОУ: два из трех — это неплохо	316
4.9.3. Частотная характеристика цепи обратной связи	265	5.11. Усилители с автообнулением (стабилизированные прерыванием)	318
Дополнительные упражнения к главе 4	269	5.11.1. Характеристики ОУ с автообнулением	318
Заключительный обзор главы 4	270	5.11.2. Когда следует использовать ОУ с автообнулением	322
<b>5. ПРЕЦИЗИОННЫЕ СХЕМЫ</b>	<b>273</b>	5.11.3. Выбор ОУ с автообнулением	322
5.1. Приемы проектирования прецизионных схем на ОУ	275	5.11.4. Автообнуление. Разное	324
5.1.1. Точность vs динамический диапазон	275	5.12. Дизайн от Мастера: цифровые мультиметры Agilent	326
5.1.2. Бюджет ошибок	275	5.12.1. Этого <i>не может быть!</i>	326
5.2. Пример. Обновленный вольтметр	276	5.12.2. Ошибочка! Это <i>возможно</i>	326
5.2.1. Постановка задачи: 10 мВ, 1%, 10 МОм, однополярное питание 1.8 В	276	5.12.3. Блок-схема. Простой план	326
5.2.2. Прецизионный источник тока (для работы во всем диапазоне питания по входу и выходу)	276	5.12.4. Мультиметр 34401A, разрешение 6.5 разрядов	327
5.3. Подведение итогов. Бюджет погрешностей, неопределенные параметры	278	5.12.5. Мультиметр 34420A, разрешение 7.5 разрядов	328
5.4. Пример. Прецизионный усилитель с нулевым смещением	278	5.13. Усилители разностные, измерительные и с дифференциальным выходом. Общие сведения	331
5.4.1. Описание схемы	280	5.14. Дифференциальный (разностный) усилитель	332
5.5. Бюджет погрешностей для прецизионных схем	281	5.14.1. Основная схема работы	332
5.5.1. Бюджет погрешностей	282	5.14.2. Применение разностных усилителей	333
5.6. Погрешности, вносимые схемными компонентами	282	5.14.3. Параметры производительности	336
5.6.1. Резисторы, задающие усиление	283	5.14.4. Некоторые схемные модификации	339
5.6.2. Конденсатор для «аналогового запоминания»	283	5.15. Измерительный усилитель	340
5.6.3. Включатель схемы подстройки нуля	284	5.15.1. Первое (наивное) предположение	340
5.7. Ошибки по входу усилителя	285	5.15.2. Классический измерительный усилитель «с тремя ОУ»	341
5.7.1. Входное сопротивление	285	5.15.3. Особенности входных каскадов	341
5.7.2. Входной ток смещения	285	5.15.4. Измерительный усилитель «на свой лад»	343
5.7.3. Напряжение смещения	287	5.15.5. Замечания по поводу надежной защиты входов	345
5.7.4. Подавление синфазной составляющей	289	5.16. Инструментальные усилители: разное	345
5.7.5. Ослабление влияния источников питания	289	5.16.1. Входные шумы и токи	345
5.7.6. Усилитель с обнулением. Погрешности на входе	289	5.16.2. Подавление синфазной составляющей	347
5.8. Ошибки на выходе усилителя	291	5.16.3. Сопротивление источника входного сигнала и КОСС	348
5.8.1. Скорость нарастания сигнала: общие представления о погрешностях	291	5.16.4. Электромагнитные помехи и защита входов	348
5.8.2. Полоса пропускания и время установления	292	5.16.5. Смещение и подстройка КОСС	349
5.8.3. Переходные нелинейные искажения на выходе и выходное сопротивление	293	5.16.6. Измерения непосредственно в нагрузке	349
5.8.4. Буферные усилители с единичным усилением	293	5.16.7. Контуры задания смещения на входе	350
5.8.5. Ошибка усиления	295	5.16.8. Диапазон выходного напряжения	350
5.8.6. Нелинейность коэффициента усиления	296	5.16.9. Пример использования. Источник тока	350
5.8.7. Погрешность фазового сдвига и активная коррекция	297	5.16.10. Прочие конфигурации	350
5.9. ОУ категории RRIO: хорошие, плохие, злые...	299	5.16.11. Измерительные усилители с автообнулением и стабилизированные прерыванием	353
		5.16.12. Измерительные усилители с программируемым усилением	353
		5.16.13. Формирование сигнала на дифференциальном выходе	355
		5.17. Полностью дифференциальные усилители	356



5.17.1. Полностью дифференциальные усилители: основные понятия	359	8.1.5. Ограниченный по полосе шум	456
5.17.2. Пример применения полностью дифференциального усилителя: широкополосная аналоговая линия	362	8.1.6. Интерференция	457
5.17.3. АЦП с дифференциальным входом	362	8.2. Отношение сигнал/шум и коэффициент шума	457
5.17.4. Согласование импедансов	364	8.2.1. Плотность мощности шума и ширина полосы	457
5.17.5. Критерии выбора дифференциального усилителя	365	8.2.2. Отношение сигнал/шум	457
Заключительный обзор главы 5	369	8.2.3. Коэффициент шума	458
<b>6. ФИЛЬТРЫ</b>	<b>373</b>	8.2.4. Температура шума	458
6.1. Введение	373	8.3. Шум усилителя на БТ	459
6.2. Пассивные фильтры	373	8.3.1. Шум напряжения $e_{ш}$	459
6.2.1. Частотная характеристика RC-фильтров	373	8.3.2. Шум тока $i_{ш}$	461
6.2.2. Идеальный рабочий режим LC-фильтров	375	8.3.3. Напряжение шума БТ (второй подход)	462
6.2.3. Несколько простых примеров	375	8.3.4. Простой пример. Динамик в качестве микрофона	463
6.2.4. Введение в активные фильтры. Обзор	378	8.3.5. Дробовой шум источников тока и эмиттерных повторителей	465
6.2.5. Ключевые критерии эффективности фильтра	381	8.4. Величина $e_{ш}$ по данным о КШ	466
6.2.6. Типы фильтров	382	8.4.1. Шаг 1. Зависимость КШ от $I_k$	466
6.2.7. Практическая реализация фильтрации	387	8.4.2. Шаг 2. Зависимость КШ от $R_{ист}$	467
6.3. Схемы активных фильтров	387	8.4.3. Переход к значению $e_{ш}$	467
6.3.1. Схемы фильтров на ИНУН	388	8.4.4. Шаг 4. Спектр $e_{ш}$	468
6.3.2. Проектирование фильтров на ИНУН с использованием упрощенных таблиц	389	8.4.5. Шаг 5. Спектр $e_{ш}$	468
6.3.3. Фильтры на основе метода переменных состояния	392	8.4.6. Если рабочий ток выбрать нельзя	469
6.3.4. Двойной Т-образный режекторный фильтр (фильтр-пробка)	395	8.5. Разработка малошумящих схем на БТ	469
6.3.5. Фазовые фильтры	397	8.5.1. Пример расчета КШ	469
6.3.6. Фильтры на коммутируемых конденсаторах	397	8.5.2. Графический метод оценки шума по $e_{ш}$ и по $i_{ш}$	470
6.3.7. Цифровая обработка сигналов	400	8.5.3. Шумовое сопротивление	471
6.3.8. Дополнительные сведения для разработчиков	404	8.5.4. Построение семейства кривых шума	471
Дополнительные упражнения к главе 6	404	8.5.5. Малошумящий схемы на БТ. Два примера	472
Заключительный обзор главы 6	404	8.5.6. Снижение шума. БТ и ПТ, трансформаторы	473
<b>7. ГЕНЕРАТОРЫ И ТАЙМЕРЫ</b>	<b>407</b>	8.5.7. Пример. Предусилитель для «детектора молний» стоимостью \$0.4	473
7.1. Генераторы	407	8.5.8. Выбор малошумящих БТ	476
7.1.1. Введение	407	8.5.9. Сложная задача. Бестрансформаторный предусилитель для ленточного микрофона со сверхнизким шумом	481
7.1.2. Релаксационные генераторы	407	8.6. Разработка малошумящих схем на ПТ с управляющим $pn$ -переходом	484
7.1.3. Классическая ИС таймера — 555	410	8.6.1. Напряжение шума ПТ- $pn$	485
7.1.4. Другие ИС для релаксационных генераторов	414	8.6.2. Токовый шум ПТ- $pn$	486
7.1.5. Генераторы синусоидального сигнала	416	8.6.3. Пример разработки. Широкополосный малошумящий гибридный усилитель	487
7.1.6. Генераторы с кварцевыми резонаторами	424	8.6.4. Дизайн от Мастера. Малошумящий предусилитель SR560	488
7.1.7. Повышение стабильности: термостатированные, термокомпенсированные и некоторые другие генераторы	431	8.6.5. Выбор малошумящих ПТ- $pn$	490
7.1.8. Синтез частот. Системы прямого цифрового синтеза и фазовой автоподстройки	432	8.7. Дуэль ПТ и БТ в картинках	493
7.1.9. Квадратурные генераторы	433	8.7.1. А что насчет МОП-транзисторов?	494
7.1.10. Флуктуации генераторов	437	8.8. Шумы дифференциальных усилителей и усилителей с ОС	495
7.2. Таймеры	437	8.9. Шумы в схемах с операционными усилителями	496
7.2.1. Пошагово-формируемые импульсы	438	8.9.1. Руководство к табл. 8.3. Выбор малошумящего усилителя	496
7.2.2. Моностабильный мультивибратор	440	8.9.2. Коэффициент ослабления источника питания	506
7.2.3. Ограничение длительности импульсов и скважности с помощью ММ	445	8.9.3. Подводя итоги: выбор малошумящего ОУ	506
7.2.4. Выдержка времени с помощью счетчика	445	8.9.4. Малошумящие инструментальные ОУ и видеоусилители	507
Заключительный обзор главы 7	449	8.9.5. Малошумящие гибридные ОУ	507
<b>8. МАЛОШУМЯЩАЯ АППАРАТУРА</b>	<b>452</b>	8.10. Сигнальные трансформаторы	508
8.1. Шум	452	8.10.1. Малошумящий широкополосный усилитель с трансформаторной ОС	509
8.1.1. Тепловой шум	453	8.11. Шум в трансимпедансных усилителях	510
8.1.2. Дробовой шум	454	8.11.1. Общий обзор проблем устойчивости	511
8.1.3. Шум вида $1/f$ (фликкер-шум)	455	8.11.2. Входной шум усилителя	511
8.1.4. Импульсный (взрывной) шум	456	8.11.3. Проблема шума $e_{ш}C$	511

8.11.4. Шумы трансрезистивного усилителя	512	9.3.4. Стабилизатор в стиле ИС 317. Тонкости применения	569
8.11.5. Пример. Широкополосный усилитель для фотодиода на ПТ	513	9.3.5. Примеры схем стабилизаторов в стиле ИС 317	572
8.11.6. Шум $1/f$ усиление в трансимпедансных усилителях	514	9.3.6. Стабилизаторы с малым падением напряжения	575
8.11.7. Ограничение рабочей полосы на выходе трансимпедансного усилителя	515	9.3.7. Стабилизаторы с истинно малым падением напряжения	575
8.11.8. Композитные трансимпедансные усилители	515	9.3.8. Трехвыводные стабилизаторы с опорным током	576
8.11.9. Снижение входной емкости: активная компенсация в ТИУ	518	9.3.9. Сравнение стабилизаторов по падению напряжения вход-выход	577
8.11.10. Изоляция входной емкости. Каскод в трансимпедансном усилителе	520	9.3.10. Пример. Стабилизатор с двойным регулируемым напряжением	577
8.11.11. Трансимпедансные усилители с емкостной обратной связью	523	9.3.11. Выбор линейного стабилизатора	577
8.11.12. Предусилитель для туннельного сканирующего микроскопа	524	9.3.12. Идиосинкразия на линейные регуляторы	578
8.11.13. Тестовое оборудование для настройки и калибровки	525	9.3.13. Фильтрация шумов и пульсаций	583
8.11.14. Эпилог	526	9.3.14. Источники тока	584
8.12. Измерение шума, источники шума	526	9.4. Повышенная тепловая и мощностная нагрузка	587
8.12.1. Измерения без источника шума	526	9.4.1. Мощные транзисторы и теплоотвод	587
8.12.2. Пример. Схема тестирования шумов транзистора	526	9.4.2. Область безопасной работы	591
8.12.3. Измерения с источником шума	527	9.5. От сети переменного тока до нестабилизированного питания	592
8.12.4. Источники сигнала и шума	528	9.5.1. Компоненты сети переменного тока	593
8.13. Ограничение рабочей полосы, измерение скз-напряжения	531	9.5.2. Трансформатор	595
8.13.1. Ограничение рабочей полосы	531	9.5.3. Компоненты схемы на постоянном токе	596
8.13.2. Расчет интегрального шума	533	9.5.4. Нестабилизированный источник расщепленного питания — прямо на полку	598
8.13.3. «Низкочастотный шум» ОУ и асимметричные фильтры	534	9.5.5. Шумы и пульсации в линейных и импульсных стабилизаторах	598
8.13.4. Определение частоты перегиба графика $1/f$	535	9.6. Импульсные стабилизаторы и преобразователи постоянного тока	599
8.13.5. Измерение напряжения шума	536	9.6.1. Линейные против импульсных	599
8.13.6. Измерение шумового тока	538	9.6.2. Топологии импульсных преобразователей	600
8.13.7. Другой путь: создание собственного прибора диапазона $fA\sqrt{\Pi}$	540	9.6.3. Безындуктивные импульсные преобразователи	601
8.13.8. Попурри на тему шума	542	9.6.4. Преобразователи на основе индуктивности: основные неизолированные топологии	604
8.14. Улучшение отношения сигнал-шум за счет сужения полосы	542	9.6.5. Понижающий стабилизатор	604
8.14.1. Синхронизирующее детектирование	543	9.6.6. Повышающий стабилизатор	608
8.15. Шум источников питания	545	9.6.7. Инвертирующий стабилизатор	609
8.15.1. Умножитель емкости	546	9.6.8. Общие замечания относительно неизолированных стабилизаторов	610
8.16. Интерференция, экранирование, заземление	547	9.6.9. Режимы преобразования по току и по напряжению	612
8.16.1. Интерференция сигналов	547	9.6.10. Преобразователи с трансформаторами: базовая конфигурация	613
8.16.2. Сигнальное заземление	549	9.6.11. Обратногоходовый преобразователь	614
8.16.3. Межприборное заземление	550	9.6.12. Прямоходовый преобразователь	617
Дополнительные упражнения к главе 8	554	9.6.13. Мостовые преобразователи	619
Заключительный обзор главы 8	555	9.7. «Автономные» импульсные источники с питанием от сети	620
<b>9. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ</b>	<b>560</b>	9.7.1. Входной каскад переменный ток— постоянный ток	620
9.1. Руководство к действию: от стабилизатора к последовательному линейному стабилизатору	561	9.7.2. Преобразователи постоянного тока	622
9.1.1. Добавляя обратную связь	562	9.8. Пример импульсного источника питания	624
9.2. Базовые схемы стабилизаторов на основе классической ИС 723	564	9.8.1. Импульсные преобразователи. Взгляд сверху	625
9.2.1. ИС стабилизатора 723	564	9.8.2. Основы процесса переключения	625
9.2.2. В защиту атакованной ИС 723	566	9.8.3. Более пристальный взгляд на ключи	627
9.3. Полностью интегрированные линейные стабилизаторы	566	9.8.4. Эталонный дизайн источника питания	630
9.3.1. Таксономия ИС линейных стабилизаторов	566	9.8.5. Общие замечания относительно импульсных источников с питанием от сети	631
9.3.2. Трехвыводные нерегулируемые стабилизаторы	566	9.8.6. Когда же использовать импульсники?	632
9.3.3. Трехвыводные регулируемые стабилизаторы	568	9.9. Инверторы и импульсные усилители	632
		9.10. Источники опорного напряжения	633



9.10.1. Стабилитроны	633	<b>В. РЕЗИСТОРЫ</b>	<b>666</b>
9.10.2. Бандгап: источник опорного напряжения на $U_{\text{бз}}$ -стабилитроне	635	В.1. Немного истории	666
9.10.3. Источник опорного напряжения на ПТ с $pn$ -переходом с отсечкой	639	В.2. Доступные номиналы	666
9.10.4. Источник опорного напряжения с парящим затвором	639	В.3. Маркировка резисторов	667
9.10.5. Трехвыводные прецизионные источники опорного напряжения	640	В.4. Типы резисторов	667
9.10.6. Шум источников опорного напряжения	640	В.5. Случается и путаница	667
9.10.7. Дополнительные комментарии к работе источников опорного напряжения	641	<b>Г. ТЕОРЕМА ТЕВЕНИНА</b>	<b>669</b>
9.11. Коммерческие модули источников питания	643	Г.1. Доказательство	669
9.12. Устройства хранения энергии: батареи и конденсаторы	644	Г.2. Теорема Нортона	670
9.12.1. Характеристики батарей	645	Г.3. Еще один пример	670
9.12.2. Выбор батареи	646	Г.4. Теорема Миллмана	670
9.12.3. Хранящие энергию конденсаторы	646	<b>Д. LC-ФИЛЬТР БАТТЕРВОРТА</b>	<b>671</b>
9.13. Дополнение к стабилизации	647	Д.1. Низкочастотный фильтр	671
9.13.1. Избыточное напряжение	647	Д.2. Высокочастотный фильтр	671
9.13.2. Расширяя входной диапазон	650	Д.3. Примеры фильтров	672
9.13.3. Ограничение тока схемой с обратным наклоном характеристики	651	<b>Е. НАГРУЗОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ</b>	<b>674</b>
9.13.4. Внешние проходные транзисторы	652	Е.1. Пример	674
9.13.5. Высоковольтные стабилизаторы	653	Е.2. Трехвыводные устройства	674
Заключительный обзор главы 9	656	Е.3. Нелинейные устройства	675
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>		<b>Ж. АНАЛИЗАТОР ХАРАКТЕРИСТИК</b>	<b>677</b>
<b>А. МАТЕМАТИКА СХЕМОТЕХНИКИ</b>	<b>660</b>	<b>З. ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ, СОГЛАСОВАНИЕ ИМПЕДАНСОВ</b>	<b>678</b>
А.1. Тригонометрия, экспоненты и логарифмы	660	З.1. Некоторые свойства линии передачи	678
А.2. Комплексные числа	660	З.2. Согласование импедансов	683
А.3. Дифференциальное исчисление	661	З.3. Линии задержки с сосредоточенными элементами	686
<b>Б. КАК РИСОВАТЬ СХЕМЫ</b>	<b>663</b>	формирователи импульсов	686
Б.1. Общие принципы	663	З.4. Эпилог. «Лестничный» метод вывода волнового импеданса	687
Б.2. Правила	663	<b>И. ОСЦИЛЛОГРАФЫ</b>	<b>691</b>
Б.3. Советы	664	И.1. Аналоговый осциллограф	691
Б.4. Скромный пример в тему	665	И.2. Цифровой осциллограф	695
		<b>К. SPICE PRIMER. СВОБОДНАЯ ДЕМОВЕРСИЯ ICAP/4</b>	<b>698</b>
		<b>Л. ЛАБОРАТОРНЫЕ ПРИБОРЫ И ИНСТРУМЕНТЫ</b>	<b>701</b>
		<b>О. ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>703</b>
		<b>ЮРИДИЧЕСКАЯ СПРАВКА ОТ АВТОРОВ</b>	<b>706</b>