

УЧЕБНИК

# ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

АНАЛОГОВЫХ  
УСТРОЙСТВ

Роберт А. Пиз

Книга, написанная американским ученым Робертом Пизом, посвящена поиску неисправностей в аналоговых схемах, однако предлагаемые технические решения могут пригодиться и при работе с большинством цифровых аппаратных средств.

Автор подходит к проблеме поиска и устранения различных дефектов с позиции инженера-проектировщика, иллюстрируя теоретические положения примерами из личного опыта.

В книге рассматриваются методы выявления неисправностей, тестирования схем и их компонентов, подробно анализируются неполадки, связанные с пассивными и активными элементами и устройствами: резисторами, конденсаторами, диодами, транзисторами, операционными усилителями, источниками опорного напряжения, стабилизаторами и др. Приводятся разводка печатных плат и информация о кабелях. Дополнительные сведения о причинах неисправностей представлены в многочисленных приложениях.

Internet-магазин:  
[www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)

Книга – почтой:  
Россия, 123242,  
Москва, а/я 20  
Тел.: (495) 258-9194  
[books@aliants-kniga.ru](mailto:books@aliants-kniga.ru)

Оптовая продажа:  
«Альянс-книга»  
Факс: (495) 258-9195  
[books@aliants-kniga.ru](mailto:books@aliants-kniga.ru)

ISBN 5-94074-004-9



9 785940 740049

[www.dmk-press.ru](http://www.dmk-press.ru)



BUTTERWORTH  
HEINEMANN

УЧЕБНИК

Роберт А. Пиз

# ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

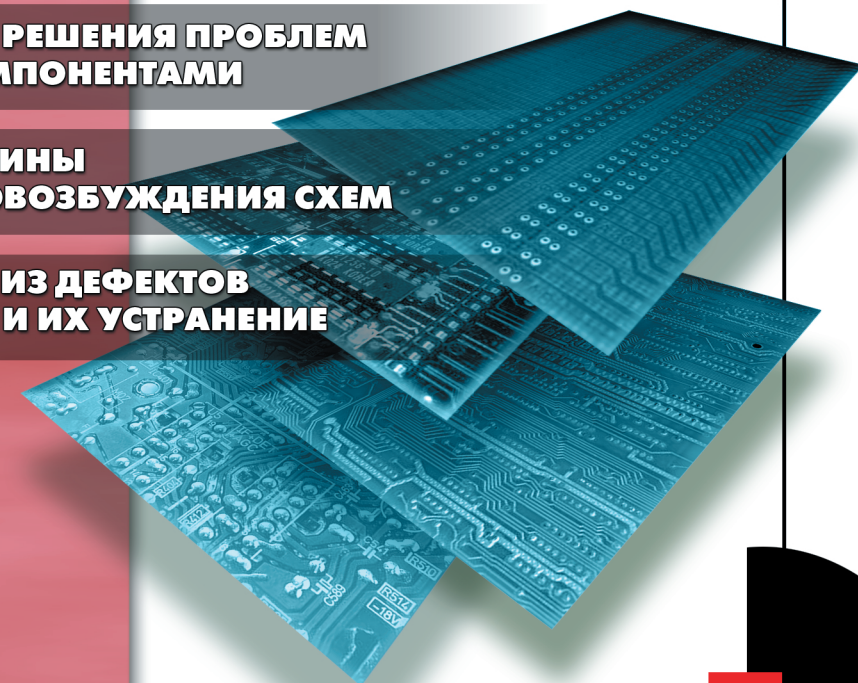
АНАЛОГОВЫХ  
УСТРОЙСТВ

ЭФФЕКТИВНАЯ МЕТОДИКА  
ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ  
С КОМПОНЕНТАМИ

ПРИЧИНЫ  
САМОВОЗБУЖДЕНИЯ СХЕМ

АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ  
СХЕМ И ИХ УСТРАНЕНИЕ



Роберт А. Пиз

УЧЕБНИК

ПРАКТИЧЕСКАЯ  
ЭЛЕКТРОНИКА

АНАЛОГОВЫХ  
УСТРОЙСТВ

ВН



ВН



# УЧЕБНИК

---

Учебник

Роберт А. Пиз

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ

Поиск неисправностей и отработка  
проектируемых схем



Москва

**ББК 32.844я75**  
**ПЗ2**

**Пиз А. Роберт**

**ПЗ2** Практическая электроника аналоговых устройств. Поиск неисправностей и отработка проектируемых схем: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс.– 320 с.: (Серия «Учебник»).

**ISBN 5-94074-004-9**

Книга, написанная американским инженером Робертом Пизом, посвящена поиску неисправностей в аналоговых схемах, однако предлагаемые технические решения могут пригодиться и при работе с цифровыми устройствами.

Автор подходит к проблеме поиска и устранения различных дефектов с позиции инженера-проектировщика, иллюстрируя теоретические положения примерами из личного опыта.

В первой главе книги обсуждаются методы выявления неисправностей, тестирования схем и их компонентов. Во второй главе основное внимание уделено оборудованию для диагностики; последующие разделы содержат подробный анализ неполадок, связанных с пассивными и активными элементами и устройствами: резисторами, конденсаторами, диодами, транзисторами, операционными усилителями, источниками опорного напряжения, стабилизаторами и др. Также приводится информация о печатных платах и о кабелях.

Дополнительные сведения о причинах неисправностей представлены в многочисленных приложениях. Особо рассмотрены принципы использования технической документации.

**ББК 32.844я75**

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 0-7506-9499-8  
ISBN 5-94074-004-9

Reed Educational & Professional Publishing Ltd  
© Troubleshooting Analog Circuits 2<sup>nd</sup> Edition by R. Pease  
© ДМК Пресс

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>Введение</b> .....	9
<b>1. Начнем сначала. Философия и неисправности</b> .....	16
1.1. Философский подход к поиску неисправностей .....	16
1.2. Если бы все и всегда работало.....	17
1.3. Хороший совет можно получить не только от эксперта .....	20
1.4. Учитесь искать подсказки .....	20
1.5. Спрашивайте, записывайте, фиксируйте, запоминайте .....	21
1.6. Планирование работы .....	22
1.7. Пусть законы Мерфи работают на вас .....	24
1.8. Выберите Царя проблемы .....	25
1.9. Документооборот как путь к успеху (или краху) .....	26
1.10. Анализ отказа .....	26
1.11. Ремонт по телефону – занятие тяжелое .....	28
1.12. Ремонтника компьютером не заменишь! .....	30
1.13. Компьютер – ваш помощник, но друг ли.....	31
1.14. Нет проблем? Ах, нет проблем! Будут!.....	31
<b>2. Подбор инструментария</b> .....	33
<b>3. Резисторы и дроссели</b> .....	50
3.1. Характеристики резисторов .....	51
3.2. Температурные коэффициенты .....	54
3.3. Переменные резисторы и потенциометры .....	56
3.4. Номинальные режимы работы потенциометров .....	57
3.5. Осторожно: механические повреждения .....	59
3.6. Когда резистор – не только резистор .....	60
3.7. Дроссели и трансформаторы .....	62
3.8. Эквивалентная схема трансформатора .....	62
3.9. Защита транзисторов от выбросов напряжения .....	64
3.10. Перегрев индуктивных элементов .....	67
3.11. Влияние внешних магнитных полей .....	68
<b>4. Проблемы с конденсаторами</b> .....	69
4.1. неполярные конденсаторы .....	71
4.2. Обкладки пленочных конденсаторов .....	72
4.3. Выводы пленочных конденсаторов .....	74
4.4. Эквивалентное последовательное сопротивление .....	77
4.5. Серебряно-слюдяные конденсаторы .....	78
4.6. Переменные конденсаторы .....	79
4.7. Методы добавления или замены типа .....	80
4.8. Как искать неисправности .....	82



<b>5. Детали и монтаж: печатные платы, разъемы, реле и переключатели</b>	83
5.1. Проблемы с печатными платами	84
5.2. Поиск утечек	86
5.3. Размещение деталей на печатных платах	91
5.4. Четырехпроводная схема, или Схема Кельвина	95
5.5. «Холодные» пайки	97
5.6. Радиотехника – наука о контактах	98
5.7. Неординарные методы	99
5.8. Реле и контакторы	100
5.9. Выключатели, переключатели и тумблеры	102
5.10. Провода и кабели	102
5.11. Выбор проводов	103
<b>6. Диоды</b>	105
6.1. Проблемы быстрого действия	108
6.2. Особенности переходных процессов	108
6.3. Особенности применения диодов	111
6.4. Стабилитроны	113
6.5. Светодиоды	115
6.6. Оптопары	116
6.7. Солнечные батареи	118
6.8. Батареи и аккумуляторы	119
<b>7. Транзисторы: неисправности и их предупреждение</b>	122
7.1. Коэффициент передачи	125
7.2. Полевые транзисторы	126
7.3. Мощные транзисторы	130
7.4. Правило пяти секунд	132
7.5. Технология изготовления	132
7.6. Разработка силовых схем	135
7.7. МОП транзисторы	136
<b>8. Операционные усилители</b>	139
8.1. Нельзя пренебрегать мелочами	140
8.2. Синфазные сигналы	141
8.3. Коэффициент ослабления синфазного сигнала	142
8.4. Как надо измерять КОСС	146
8.5. Однополярное питание	149
8.6. Входное сопротивление или входной ток	150
8.7. Ложные неисправности	150
8.8. Реальные проблемы	152
8.9. Самовозбуждение операционных усилителей	154
8.10. Шумы: теория и практика	159
8.11. Дробовой шум	160

8.12. Техническая документация .....	161
8.13. Методы исправления ошибок .....	163
<b>9. Подавление паразитных колебаний .....</b>	<b>166</b>
9.1. Внимание! Самовозбуждение .....	168
9.2. Когда самовозбуждение – не самовозбуждение .....	169
9.3. Проблемы с компараторами .....	171
9.4. Чувствительность компараторов .....	173
9.5. Шумы в компараторах .....	174
9.6. Диапазон синфазных сигналов .....	176
9.7. Изменение уровня синфазного сигнала .....	177
9.8. Самовозбуждение повторителей .....	178
9.9. Защелкивание .....	181
<b>10. Аналоговые и цифровые схемы .....</b>	<b>184</b>
10.1. Таймеры .....	184
10.2. Цифровые интегральные микросхемы .....	186
10.3. «Плавающий» вход .....	186
10.4. Сигналы .....	188
10.5. Наводящие вопросы .....	192
10.6. Работа с ЦАП .....	194
10.7. Проблемы с АЦП .....	196
10.8. «Бумажные проекты» не для АЦП .....	197
10.9. Земляная петля .....	199
10.10. ПНЧ .....	199
10.11. ПЧН .....	200
10.12. Устройства выборки-хранения: электронные стробоскопы .....	201
10.13. Время аперттуры .....	201
10.14. Время выборки .....	203
10.15. Мультиплексор .....	203
10.16. Электронные цифровые вычислительные машины .....	204
10.17. Программное обеспечение .....	204
<b>11. Источники опорного напряжения и стабилизаторы .....</b>	<b>206</b>
11.1. Стабилизаторы .....	207
11.2. Проблема максимального напряжения .....	208
11.3. Наихудший случай .....	209
11.4. Импульсные стабилизаторы .....	210
11.5. Разные стабилизаторы .....	212
11.6. Об игрушках и о серьезном .....	214
<b>12. Практические советы из заглавника .....</b>	<b>216</b>
12.1. Поиск неисправностей .....	216
12.2. Программа SPICE .....	217
12.3. Результаты статистических анализов .....	220
12.4. Держи ноги в тепле, а голову (и приборы) на холоде.....	222

12.5. Стрелочные приборы .....	222
12.6. Цифровые приборы .....	223
12.7. Источники сигналов .....	227
12.8. Не откладывайте на завтра то, что можно исправить сегодня .....	227
12.9. Системы и схемы .....	229
12.10. Настройка аналоговых схем .....	229
12.11. Макетные платы без пайки .....	230
<b>13. Письма Бобу .....</b>	<b>233</b>
<b>14. Реальные схемы – реальные проблемы .....</b>	<b>256</b>
14.1. Вернемся к электронным схемам .....	257
14.2. Еще кое-что из заглавника .....	272
14.3. Заключение .....	273
<b>Приложение А.</b>	
<b>Цифровые микросхемы с нестандартной цоколевкой .....</b>	<b>274</b>
<b>Приложение В.</b>	
<b>Операционные усилители     с нестандартной цоколевкой .....</b>	<b>275</b>
<b>Приложение С.</b>	
<b>Причины и последствия появления шумов     в трехвыводных стабилизаторах напряжения .....</b>	<b>279</b>
<b>Приложение D.</b>	
<b>Измерение смещения нуля     в быстродействующих компараторах .....</b>	<b>284</b>
<b>Приложение E.</b>	
<b>Зависимость <math>V_F</math> от <math>I_F</math> у разных диодов .....</b>	<b>287</b>
<b>Приложение F.</b>	
<b>Как правильно читать техническую документацию .....</b>	<b>290</b>
<b>Приложение G.</b>	
<b>Еще раз о программе SPICE .....</b>	<b>299</b>
<b>Приложение H.</b>	
<b>Список статей Р. Пиза,     посвященных поиску неисправностей .....</b>	<b>307</b>
<b>Алфавитный указатель .....</b>	<b>308</b>

<h1>AUTEX Ltd.</h1> <p><b>Официальный представитель</b></p>	<h1>а</h1>
<p>Специальные цены и комплексные поставки электронных компонентов  <b>более 30 фирм-производителей под серийные проекты</b></p> <p>Тел. : (095) 334-7741, 334-9151          Факс: (095) 334-8729, 234-9991          info@autex.ru      www.autex.ru</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Операционные усилители <b>AD855x, AD857x</b> - <math>U_{cm,0} &lt; 1</math> мкВ</li> <li>➤ Дешевые прецизионные АЦП <b>AD7705</b> - 16 бит</li> <li>➤ Малопотребляющие АЦП <b>AD7888</b> - 12 бит, 8 каналов</li> <li>➤ 8-канальные ЦАП <b>AD7839</b> – 13 бит; <b>AD7841</b> - 14 бит</li> <li>➤ Малопотребляющие ЦАП <b>AD5541 / AD5542</b> - 16 бит</li> <li>➤ Сигнальные процессоры <b>ADSP</b></li> <li>➤ Весь спектр продукции <b>ANALOG DEVICES</b></li> </ul>

## ВВЕДЕНИЕ

### Вступительное слово

«Парень, твоя идея настолько хороша, что еще через двадцать минут я поверю – она изначально принадлежит мне». Я редко слышу подобную похвалу в свой адрес, но наверняка заслужил бы такой комплимент, предложив опубликовать в журнале EDN цикл статей Боба Пиза «Поиск неисправностей и отладка аналоговых схем», и это, конечно, повысило бы мой авторитет в редакции журнала. Однако на самом деле авторы этой идеи Йон Титус (Jon Titus), вице-президент, председатель редколлегии и главный редактор журнала EDN, и Тарлтон Флеминг (Tarlton Fleming), тогда первый помощник редактора EDN, а в настоящее время менеджер отдела практического применения микросхем в корпорации Maxim Integrated Products Corporation.

В начале 1988 года Джон с редакторами штаб-квартиры издательства EDN (а также издательской компании Cahners Publishing Company) в г. Ньютон (Массачусетс) провел мозговой штурм, обсуждая, какие статьи можно было бы заказать работникам промышленности... Учитывая, что читатели EDN обычно используют этот журнал как источник практических идей для более эффективной работы, а также поиска неисправностей и отладки техники, Джон предположил, что необходимы статьи, посвященные именно этим вопросам.

Тарлтон, редактор популярного раздела Design Ideas<sup>1</sup> журнала EDN, постоянно сотрудничал с Бобом, который рецензировал присылаемые читателями схемы аналоговых устройств. Тарлтон вспомнил, что Боб рассказывал ему о книге, которую он собирался написать вместе с коллегами из компании National Semiconductor. Очевидно, Боб уже подготовил некоторый материал по вопросам поиска неисправностей. Нужно было выяснить, предоставит ли National Semiconductor издательству EDN права на публикацию фрагмента этой книги. Тарлтон начал переговоры.

<sup>1</sup> Наиболее близкий русский вариант – «Радиоинженеру на заметку». – Прим. переводчика.



Некоторое время спустя в EDN получили объемистый пакет. В нем содержался текст того, что в конце концов стало первыми тремя частями написанного Бобом цикла статей. К этому времени Тарлтон покинул Восточное побережье и отправился на поиски счастья и успеха в Силиконовую долину. Таким образом, на рецензирование подготовленный Бобом материал передали мне. Я быстро просмотрел текст, и он меня заинтриговал.

Мы с Бобом практически сверстники – я всего на несколько лет старше. Кроме того, оба закончили Массачуссетский технологический институт, хотя во времена студенчества не были знакомы. Впервые я услышал о Бобе, когда он работал в компании George A. Philbrick Researches, которая в настоящее время является частью Teledyne Components и расположена в городе Дедхаме (Массачусетс). Уже в то время – 60-е – начало 70-х – Боб был плодовитым автором. Он делился своими мыслями и техническими идеями с клиентами Philbrick и инженерами-разработчиками аналоговых схем, читателям внутреннего издания фирмы The Lightning Empiricist, а также с читателями коммерческих журналов, таких как EDN.

Уже этими ранними публикациями Боб завоевал себе авторитет не только специалиста и эксперта, но человека с удивительным чувством юмора и любовью к каламбурам. Некоторые считают игру слов примитивной формой юмора. Другие не стесняются своей любви к каламбурам, именно к этой категории относимся мы с Бобом. Много лет назад, впервые прочитав написанный Бобом материал, я подумал, что, если встречу автора, он мне наверняка понравится. Поэтому, когда мне в руки попал присланный в EDN текст, я почувствовал, что после долгой разлуки обрел старого друга.

Форма подачи материала отличалась от принятой в EDN. Конечно, это был технический текст, но, по сравнению с тем, что мы обычно публиковали, написанный легко. Формул было немного, а сложные схемы вообще отсутствовали.

Понравится ли это читателям? Я решил, что наверняка понравится: рукопись насыщена содержательными и четко сформулированными идеями. Стиль изложения, конечно, необычен.

Редакция журнала предъявляла жесткие требования к текстам, даже абсолютно понятные и читабельные вгонялись в принятые рамки. Теперь ограничения несколько ослаблены. По-прежнему, добиваясь ясности изложения, мы подвергаем статьи переделке, но при этом стараемся сохранить стиль и индивидуальность автора. Я считаю, что одной из причин изменения нашего отношения к этому вопросу был успех статей Боба.

Стиль Боба отражает не только его чувство юмора, но и своеобразие причудливой натуры. Однако наиболее ярко стиль проявляется в высокой требовательности к себе и в исключительном профессионализме. Стоит особо отметить, что если бы мы попытались перекроить присланный материал, придав ему традиционную форму, то это привело бы к значительным содержательным потерям. Причины такого успеха Боба в том, кто он и как он подходит к решению проблем. Сохранив стиль Боба, мы смогли донести до читателя его индивидуальность.

Одно из правил, принятых в EDN, – не использовать риторических вопросов. Ответ читателя на такой вопрос может быть совершенно неожиданным, что иногда приводит к искажению авторской мысли. В редакции шутят: риторические