

УДК 621.396.6(035.3)  
ББК 32.844я81  
Б97

Данное издание подготовлено при участии российского представительства компании Texas Instruments. На русскоязычном сайте [www.ti.com/ru](http://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.

### **Бэйкер, Бонни**

**Б97** Что нужно знать цифровому инженеру об аналоговой электронике / Бонни Бэйкер ; пер. с англ. Ю. С. Магды. — М. : ДМК Пресс, 2018. — 360 с. : ил. — (Серия «Схемотехника»). — Доп. тит. л. англ. — ISBN 978-5-97060-583-7.

Книга может служить практическим руководством разработчика, охватывая наиболее важные сферы проектирования аналоговой электроники: аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование, применение операционных усилителей и фильтров, а также интеграцию аналоговых и цифровых систем. Материал книги составлен таким образом, чтобы помочь инженерам, занимающимся, в основном, разработкой цифровой электроники, освоить проектирование аналоговых схем.

Книга помогает по-новому, используя аналоговый подход, взглянуть на проектирование устройств, что позволяет быстро решать возникающие проблемы. Особое внимание уделяется таким основополагающим, но почему-то редко рассматриваемым в подобных изданиях темам, как влияние шумов на качество работы схемы, применение инструментальных средств и оборудования при настройке и тестировании аналоговых устройств.

Книгу отличают многочисленные описания практических примеров проектирования схем, а также советы по выбору подходящих инструментальных программно-аппаратных средств, без которых не обойтись в процессе разработки.

Книга предназначена для инженеров-практиков, разрабатывающих цифровые схемы, а также будет полезна студентам и преподавателям, сталкивающимся с проблемами проектирования аналоговых схем для цифровых устройств. Свободный стиль повествования, используемый автором, одинаково хорошо воспринимается как студентами, так и профессиональными инженерами.

УДК 621.396.6(035.3)  
ББК 32.844я81

Книга «Что нужно знать цифровому разработчику об аналоговой электронике» Бонни Бэйкер подготовлена и издана по договору с Elsevier INC, 200 Wheeler Road, 6th Floor, Burlington, MA01803, USA.

ISBN 0-7506-7819-4 (англ.)  
ISBN 978-5-94120-170-9 (Додэка)  
ISBN 978-5-97060-583-7 (ДМК Пресс)

© Elsevier Inc.  
© Додэка, оформление  
© ДМК Пресс, издание, 2018

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	11
<b>Благодарности</b> .....	13
<b>Об авторе</b> .....	14
<b>Глава 1. Аналоговая и цифровая электроника: мост через пропасть</b> .....	15
1.1. Цифровой метод измерения температуры .....	18
1.2. Проблемные вопросы .....	21
1.2.1. Это не моя работа! .....	21
1.2.2. Подскажите, в чём дело .....	22
1.2.3. Всё это ерунда — мне нужны только данные .....	26
1.3. Универсальное средство решения проблем аналоговой схемотехники .....	29
1.4. Аналоговая и цифровая схемотехника: основные различия .....	31
1.4.1. Точность .....	31
1.4.2. Аппаратное или программное решение? .....	32
1.4.3. Время и частота .....	37
1.5. Организационные аспекты проектирования .....	37
1.6. Изучите основы и двигайтесь дальше .....	38
Литература .....	39
<b>Глава 2. Принцип работы аналого-цифровых преобразователей</b> .....	40
2.1. Основные параметры вашего АЦП .....	41
2.1.1. Диапазон входного сигнала .....	41
2.1.2. Цифровое кодирование аналогового сигнала .....	43
2.1.3. Скорость преобразования, разрешающая способность и точность .....	47
2.1.4. Точность и разрешающая способность .....	48
2.1.5. Параметры по переменному току и повторяемость результатов .....	49
2.1.6. Точность и параметры по постоянному току .....	52
2.2. АЦП последовательного приближения .....	55
2.2.1. Блок-схема КМОП-преобразователя последовательного приближения ....	56
2.2.2. Входной каскад АЦП последовательного приближения .....	59
2.3. Сигма-дельта-преобразователи .....	63
2.3.1. Принципы работы сигма-дельта-преобразователя .....	63

2.3.2. Усилитель с программируемым коэффициентом усиления в сигма-дельта-преобразователе .....	65
2.3.3. АЦП высокого порядка с уравниванием заряда .....	68
2.3.4. Цифровой фильтр нижних частот .....	70
2.3.5. Фильтр децимации .....	73
2.3.6. Ещё о сигма-дельта АЦП .....	74
2.3.7. Время установления цифрового фильтра .....	75
2.3.8. Отличия сигма-дельта АЦП разных производителей .....	77
Заключение.....	77
Литература. ....	78
<b>Глава 3. Выбор АЦП .....</b>	<b>79</b>
3.1. Типы входных сигналов .....	79
3.2. Сигнальные цепи датчиков температуры.....	84
3.3. Выбор АЦП для схем с резистивными датчиками температуры .....	87
3.3.1. Питание РТД в схеме с АЦП последовательного приближения .....	88
3.3.2. Тракт обработки сигнала РТД-элемента в схеме с АЦП ПП .....	90
3.3.3. Подходит ли АЦП последовательного приближения для устройств измерения температуры? .....	91
3.4. Тракт обработки сигнала РТД с сигма-дельта АЦП.....	91
3.4.1. Подходит ли сигма-дельта АЦП для этого приложения? .....	93
3.5. Измерение давления: АЦП последовательного приближения или сигма-дельта АЦП? ..	93
3.5.1. Пьезорезистивный датчик давления .....	93
3.6. Измеритель давления с АЦП ПП .....	95
3.6.1. АЦП последовательного приближения в схеме измерителя давления: выводы .....	95
3.7. Измеритель давления с сигма-дельта АЦП .....	96
3.7.1. Сигма-дельта АЦП в схеме измерителя давления: выводы .....	96
3.8. Устройства с фотодиодами .....	96
3.9. Схема с фотодатчиком и АЦП последовательного приближения .....	97
3.9.1. АЦП последовательного приближения в схеме с фотодатчиком: выводы ...	98
3.10. Схема с фотодатчиком и сигма-дельта АЦП.....	98
3.10.1. Сигма-дельта АЦП в схеме с фотодатчиком: выводы .....	99
3.11. Управление электроприводом .....	99
Заключение.....	105
Литература. ....	106
<b>Глава 4. Фильтрация сигналов .....</b>	<b>107</b>
4.1. Основные параметры аналогового ФНЧ .....	109
4.1.1. Аппроксимация аналоговых фильтров .....	112
4.2. Теория фильтров, устраняющих эффект наложения спектров .....	118
4.3. Реализация аналогового фильтра .....	120
4.3.1. Пассивные фильтры .....	121
4.3.2. Активные фильтры .....	122
4.3.3. Однополюсный фильтр .....	122
4.3.4. Фильтр Саллена-Кея .....	123

4.3.5. Двухполюсный фильтр с комбинированной обратной связью	123
4.4. Операционный усилитель для фильтра	124
4.5. Фильтры, устраняющие эффект наложения спектров, для аналоговых сигналов с частотами, близкими к нулю.	125
4.5.1. Модифицированная схема измерительной цепи с РТД-элементом	125
4.6. Многоканальные системы	127
4.7. Непрерывные аналоговые сигналы.	129
4.8. Выбор фильтра для устранения эффекта наложения спектров	131
Литература	131

## **Глава 5. Поиски идеального операционного усилителя для идеальной схемы** . . . . . 132

5.1. Выбор технологии	134
5.2. Базовые схемы включения ОУ	135
5.2.1. Повторитель напряжения	135
5.2.2. Усиление аналоговых сигналов	138
5.2.3. Дифференциальный усилитель	140
5.2.4. Суммирующий усилитель	141
5.2.5. Преобразование тока в напряжение	142
5.3. Применение базовых схем	143
5.3.1. Инструментальный усилитель	143
5.3.2. Плавающий источник тока	144
5.4. Подводные камни процесса разработки.	146
5.4.1. Общие советы	146
5.4.2. Усилители с однополярным питанием и сигналами от шины до шины	147
Литература	147

## **Глава 6. Операционный усилитель в линейной системе** . . . . . 148

6.1. Основы работы усилителя на постоянном токе	148
6.1.1. Аномалии входного каскада ОУ	148
6.1.2. Влияние высокого входного импеданса	154
6.1.3. Выходной сигнал усилителя не изменяется от шины до шины (как было обещано)	155
6.1.4. Правильное использование входного и выходного каскадов ОУ	159
6.1.5. Немного о параметрах по постоянному току	160
6.2. Каждый усилитель может стать генератором, а каждый генератор — усилителем	164
6.2.1. Базовая модель ОУ	165
6.2.2. Устойчивость систем с замкнутой цепью обратной связи	168
6.2.3. Передаточная функция усилителя с обратной связью	168
6.2.4. Расчёт коэффициента усиления при замкнутой цепи ОС	169
6.3. Определение устойчивости системы.	171
6.3.1. Итоги анализа устойчивости в частотном диапазоне	174
6.4. Характеристики во временной области	175
6.4.1. Скорость нарастания выходного напряжения	176
6.4.2. Время установления ( $t_s$ ) и выбросы сигнала	176
6.5. Отправляясь в путь.	177
Литература	178

<b>Глава 7. SPICE-моделирование</b>	180
7.1. Старый метод расчёта на бумаге	185
7.2. Достоверны ли результаты моделирования по существу?	189
7.3. Макромодели: что они могут?	193
7.4. Последние замечания	197
Литература.	199
<b>Глава 8. Цифровая обработка аналоговых сигналов</b>	200
8.1. Широтно-импульсный модулятор в качестве цифро-аналогового преобразователя.	201
8.1.1. Временная характеристика источника опорного напряжения	201
8.1.2. Преобразование цифрового сигнала в аналоговый	202
8.1.3. Параметры аналогового ФНЧ для ЦАП на основе ШИМ	204
8.1.4. Связь частотной и временной характеристик	206
8.2. Компаратор в схемах преобразования аналогового сигнала.	207
8.2.1. Диапазон входного сигнала компаратора ( $V_{IN+}$ и $V_{IN-}$ )	207
8.2.2. Гистерезис входного сигнала	208
8.3. Двухпороговый компаратор	209
8.4. Комбинированная схема компаратора и таймера	210
8.5. Использование таймера и компаратора в сигма-дельта АЦП	212
8.5.1. Теория сигма-дельта-преобразования	213
8.5.2. Программная модель сигма-дельта-преобразователя	215
8.5.3. Анализ погрешностей сигма-дельта АЦП, реализованного на микроконтроллере	217
8.5.4. Диапазон входных напряжений сигналов	218
Заключение.	222
Литература.	222
<b>Глава 9. Комбинированные аналого-цифровые системы</b>	223
9.1. Источники питания на батареях	224
9.2. Преобразование напряжения.	226
9.3. Расчёт КПД источника питания	227
9.3.1. КПД импульсного понижающего преобразователя напряжения	227
9.3.2. КПД преобразователя с подкачкой заряда	229
9.3.3. КПД линейного LDO-стабилизатора напряжения	230
9.4. Сравнение преобразователей напряжения	233
9.5. Выбор оптимального решения.	235
9.6. Микромощные системы на микроконтроллерах	236
9.6.1. Питание в аналого-цифровых системах	236
9.6.2. Управление тактовой частотой	239
9.6.3. Режимы ожидания и синхронизация	242
Заключение.	243
Литература.	243
<b>Глава 10. Шумы в электронных схемах</b>	244
10.1. Параметры шума: термины и определения	245

10.1.1. Пример расчёта шумовых характеристик схемы	247
10.2. Шум компонентов	250
10.2.1. Шум резистора	250
10.2.2. Шумы операционного усилителя	254
10.2.3. Шумы аналого-цифрового преобразователя	261
10.2.4. Шумы источника питания	262
10.2.5. Минимизация шумов устройства	265
10.3. Шум проводимости	266
10.3.1. Шумы в сигнальной цепи	267
10.3.2. Шумы на шине питания	267
10.3.3. Схема с улучшенными шумовыми параметрами	272
Литература	273
<b>Глава 11. Разводка схем на печатной плате</b>	<b>274</b>
11.1. Разводка печатных плат аналоговых и цифровых схем: общие моменты	274
11.1.1. Развязывающие конденсаторы	275
11.1.2. Разводка шин питания и земли	276
11.2. Слой земли в цифровых и аналоговых схемах	278
11.2.1. Размещение компонентов	278
11.3. Влияние паразитных параметров	279
11.3.1. Влияние паразитных ёмкостей	279
11.3.2. Индуктивности печатного монтажа	285
11.4. Разводка схем с АЦП	286
11.4.1. Разводка схем с АЦП последовательного приближения	286
11.4.2. Разводка платы с сигма-дельта-преобразователем	288
11.5. Разводка двухслойных печатных плат	289
11.5.1. Автоматическая трассировка	289
11.6. Дорожки обратных токов	293
11.7. Особенности разводки 12-битных измерительных систем	295
11.8. Общее руководство по разводке платы: размещение компонентов	296
11.9. Общее руководство по разводке платы: заземление и питание	296
11.10. Дорожки сигнальных цепей	299
11.11. Фильтрация и развязка	300
11.11.1. Развязывающие конденсаторы	300
11.11.2. Фильтр, устраняющий эффект наложения спектров	300
11.12. Советы по разводке печатной платы	301
Литература	302
<b>Глава 12. Отладка схем</b>	<b>303</b>
12.1. Базовые средства отладки и поиска неисправностей	303
12.2. Проверка работы АЦП	305
12.3. Шумы источника питания	308
12.4. Неправильное использование операционных усилителей	312
12.5. Не упускайте детали	314
Заключение	316
Литература	316

<b>Глава 13. Проектирование комбинированных аналого-цифровых систем</b> .....	317
13.1. Сигнальная цепь в реальный мир .....	318
13.2. Инструментальные средства разработки .....	319
13.3. Связь цифровой и аналоговой схем .....	323
Заключение.....	327
<b>Приложение А. Аналого-цифровой преобразователь: параметры, определения и формулы</b> .....	328
<b>Приложение Б. Быстрое преобразование Фурье</b> .....	336
Б.1. Анализ графика БПФ .....	336
Б.2. Основная частота входного сигнала .....	338
Б.3. Размах входного сигнала.....	338
Б.4. Отношение сигнал/шум .....	338
Б.5. Динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих .....	338
Б.6. Среднее значение собственных шумов.....	339
Б.7. Другие характеристики, получаемые в результате выполнения БПФ .....	340
Б.8. Точность результатов БПФ .....	340
Б.9. Весовые (оконные) функции .....	340
<b>Приложение В. Параметры, определения и расчётные формулы для операционных усилителей</b> .....	342
<b>Приложение Г. Продукция компании Texas Instruments</b> .....	346
<b>Предметный указатель</b> .....	355