

# 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
<b>Глава 5. Поиски идеального операционного усилителя для идеальной схемы . . . . .</b>	<b>132</b>
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
<b>Глава 6. Операционный усилитель в линейной системе . . . . .</b>	<b>148</b>
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. Микрометричные 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

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Я изучала аналоговую электронику в то время, когда преподавание базовых курсов по электронике было основано на изучении принципов работы аналоговых схем. Затем я начала свою карьеру в первоклассной фирме по выпуску продукции аналоговой электроники — Bugg-Brown. У меня не было стремления заниматься аналоговой электроникой, мне была нужна лишь работа. Тем не менее, мне пришлось поработать бок о бок с лучшими инженерами электронной промышленности. После тринадцати лет работы я решила расширить свои знания и представления в области электроники и перешла на работу в компанию, основным направлением деятельности которой была цифровая электроника. По моему убеждению, 13 — счастливое число, поскольку с этого момента и началось моё реальное образование.

Что мне удалось изучить? Я поняла, что не нужно заботиться об элегантности технического решения, а проектировать схему так, чтобы она работала в устройстве. Я поняла и то, что для выполнения работы хороши все средства, будь-то методы аналоговой или цифровой схемотехники. Более того, я убедилась, что в некоторых случаях незнание — это счастье. Многие инженеры-разработчики цифровой техники, с которыми мне пришлось работать, даже не подозревали, что решить некоторые проблемы вообще невозможно. Приведу только один пример. В Bugg-Brown мы «подгоняли» прецизионные аналоговые устройства до нужных параметров, используя высокотехнологичные методы Nisome. Этот процесс весьма специфичен в аналоговой схемотехнике и даёт высокую точность. Поэтому я сказала инженерам, что невозможно разработать прецизионные устройства без технологии Nisome. И ошиблась — Microchip разрабатывает прецизионные аналоговые схемы, используя Flash-технологию подгонки цифровых схем.

Я уже была выдавшим виды инженером аналоговой техники, но и для меня настало время изменений. Я не перешла целиком на цифровое проектирование, хотя методы цифровой схемотехники, по моему убеждению, позволяют расширить возможности проектирования электронных схем. Причиной столь пристального внимания к цифровому проектированию стал мой опыт работы с различными устройствами аналоговой схемотехники: я надеялась, что некоторые технические решения можно позаимствовать и из цифровой электроники. Эта книга для тех, кто хочет улучшить свои знания и профессиональные навыки в разработке электронных устройств.

Цифровая схемотехника и программное обеспечение всё больше влияют на проектирование аналоговых схем, но это не приведёт к полному исчезновению аналоговой электроники, поскольку всегда нужно будет обрабатывать сигналы датчиков, проектировать источники питания и компоновать печатные платы. Инженеры цифровой техники, как бы они этого не избегали, всегда будут сталкиваться с проблемами, относящимися к аналоговой электронике.

Более того, жизнь разработчика цифровых устройств в последнее время усложнилась. Усовершенствование кристаллов микроконтроллеров и микропроцессоров происходит во всех направлениях, например в плане повышения быстродействия и увеличения объёма памяти. Но наиболее интересные изменения касаются новых периферийных устройств, как аналоговых, так и цифровых. Инженеру нужно ориентироваться не только в деталях функционирования таких устройств, но также изучить и основы компоновки схем. Современный разработчик цифровой техники должен расширять свои знания, чтобы решать проблемы, которые не относятся исключительно к аппаратно-программным аспектам проектирования.

В своём продвижении вперёд разработчику цифровой техники нужно иметь под рукой некоторые базовые инструментальные средства проектирования. Эта книга написана для инженеров-практиков цифровой электроники, но может оказаться полезной для студентов, преподавателей и менеджеров-практиков, которым основы аналоговой техники необходимы для решения возникающих проблем. Книга может служить полезным справочником при разработке аналоговых систем в цифровых устройствах. Целевой аудиторией этой книги являются инженеры-разработчики встроенных систем, для которых это неплохой шанс познакомиться с аналоговой электроникой.



## ОБ АВТОРЕ

Бонни Бэйкер ведёт ежемесячную рубрику «Baker's Best» в журнале «EDN». Она занимается проектированием аналоговых и цифровых систем около 20 лет. Бонни начинала свою карьеру в качестве инженера по поддержке аналоговой продукции компании Vug-Brown. Затем она занималась разработкой микросхем и вскоре стала главным специалистом по стратегическому планированию в подразделении аналоговой электроники, а затем и менеджером по разработке корпоративных приложений. В 1998 году Бонни перешла в компанию Microchip Technology и работала руководителем проектов по разработке аналого-цифровых систем, а также ведущим инженером одного из подразделений разработки PIC-микроконтроллеров. Работа на должности ведущего инженера позволила ей существенно расширить знания не только в области аналоговой электроники, но и в области проектирования систем на микроконтроллерах.

Бонни имеет степень магистра наук по специальности «Проектирование электронных устройств» университета в Аризоне и степень бакалавра музыки университета Северной Аризоны. Имея такой огромный опыт в области проектирования аналоговых устройств, Бонни стремится поделиться им с другими — она написала свыше 200 статей и рекомендаций по проектированию и часто принимает участие в технических семинарах и конференциях.

## АНАЛОГОВАЯ И ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА: МОСТ ЧЕРЕЗ ПРОПАСТЬ

Несколько лет назад, в 2001 году на Конференции по встраиваемым системам, проходившей в Сан-Франциско, мне довелось встретить выпускника вуза, собирающегося стать инженером. Узнав о моей должности в компании Microchip, он сказал, что ищет работу, и, зная профиль деятельности этой компании, хотел, если бы представилась такая возможность, в ней работать. Он сразу же вручил мне своё резюме, а я познакомила его с некоторыми подробностями своей деятельности в Microchip. В то время я руководила группой по применению линейных и комбинированных (аналого-цифровых) систем. Наша группа занималась разработкой технических требований на изделия, составлением технической документации, обучением пользователей и работой с клиентами по всему миру. После такой презентации нашей деятельности выпускник с гордостью заявил, что это, похоже, замечательная работа. Пришлось ещё раз акцентировать его внимание на том, что я работаю в отделении аналоговых разработок компании Microchip. Он, очевидно, подумал, что успешно справился со своим домашним заданием, потому что сказал, что аналоговая электроника умирает, и мир цифровой электроники, в конечном счёте, восторжествует. Любой, кто хоть что-нибудь знал о Microchip, мог бы, наверное, с этим согласиться! Какой ужас, я осталась последней из могики.

Целый день я представляла на выставке компанию Microchip. В это время на выставочной площадке проходило много презентаций, а сам холл был заполнен экспонатами (Рис. 1.1). В хорошо освещённом помещении разносился шум разговоров, а системы кондиционирования обеспечивали комфортную обстановку. На своих стендах участники выставки показывали (хотите — верьте, хотите — нет) работу датчиков, источников питания, пассивных компонентов, устройств обработки радиосигналов и т.д. Всего здесь было несколько сотен выставочных стендов, на каждом из которых были представлены те или иные инженерные разработки.

Некоторые из производителей на своих стендах демонстрировали работу систем обработки аналоговых сигналов, как, например, Microchip — здесь датчик температуры был подключен к параллельному порту компьютера. Сам датчик размещался на плате, которая в процессе работы могла нагреваться. Датчик фиксировал изменения температуры, которые отображались на экране монитора ПК. При достижении порогового значения температуры, равного 85°C, нагревательный элемент, расположенный на плате, отключался, и на экране дисплея ПК



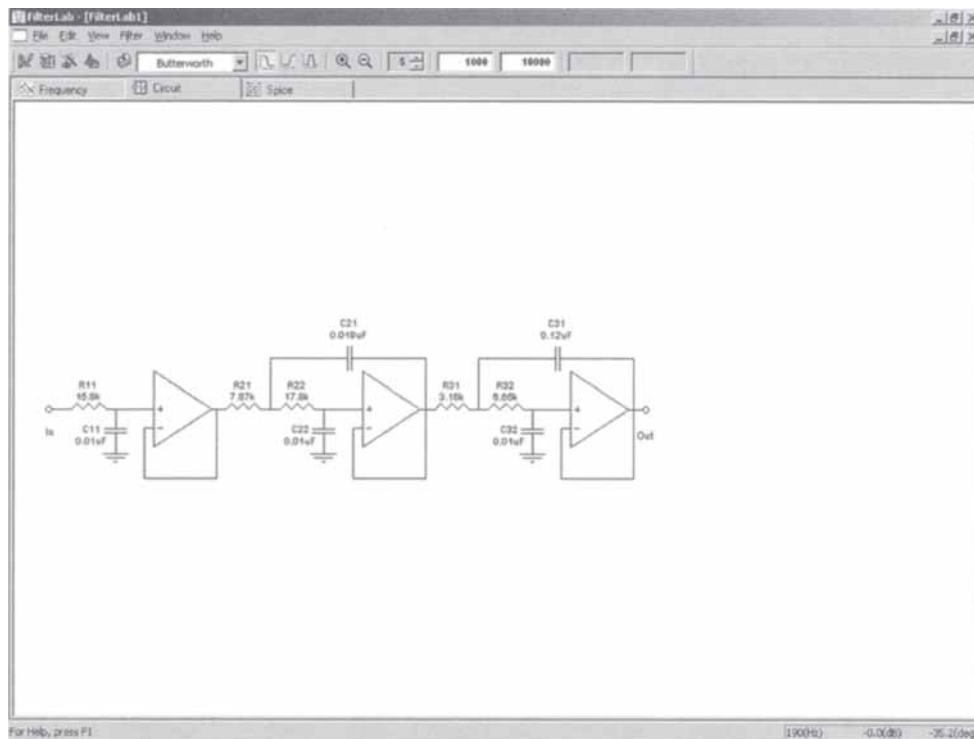
**Рис. 1.1.** На фото показан выставочный зал Конференции по встраиваемым системам 2001 года с сотнями стендов, на многих из которых были показаны разработки, относящиеся к аналоговым системам обработки данных, и это несмотря то, что конференция была посвящена цифровым системам.

можно было видеть, как температура спадает до значения  $40^{\circ}\text{C}$ , после чего нагревательный элемент включался вновь.

На другом стенде демонстрировалась новая версия программы расчёта аналоговых фильтров FilterLab® для ПК. В окне программы можно было определять такие параметры аналогового фильтра, как количество полюсов, частота среза и тип аппроксимации (Баттерворта, Бесселя или Чебышева). После ввода указанных данных программа выдавала принципиальную схему фильтра, как показано в примере на **Рис. 1.2**. Таким образом, с помощью такой программы можно теоретически рассчитать схему фильтра, а затем проверить результаты расчёта в лаборатории. Кстати, на этом стенде один из посетителей «играл» с этой программой.

На стенде номер три была показана система, которая включала блоки измерения температуры, давления и управления электродвигателем постоянного тока, соединённые между собой с помощью шины CAN. История развития сетей на основе протокола CAN насчитывает более 15 лет. Изначально шина CAN использовалась в автомобильных системах, требующих надёжности и предсказуемости, но недавнее снижение цен на оборудование CAN позволило расширить сферу его применения. В настоящее время технология CAN внедряется в промышленные сети, медицинское оборудование, железнодорожные системы сигнализации и контроля, а также в системы управления в строительной индустрии (список далеко не полный). Столь широкому распространению CAN-сетей в этих областях способствовала не только низкая стоимость технических решений, но и высокая надёжность при скорости обмена данными до 1 Мбит/с.

Сети CAN — это система связи с несколькими ведущими узлами, способная осуществлять передачу данных между всеми блоками системы, при этом каждый блок отфильтровывает нежелательные данные. Преимущество такой топологии в том, что можно легко добавить или удалить любой блок, незначительно изменив программное обеспечение системы. Каждый блок сети CAN должен обладать оп-



**Рис. 1.2.** Одно из окон программы FilterLab компании Microchip, в котором видна принципиальная схема аналогового фильтра Баттерворта нижних частот 5-го порядка с частотой среза 1 кГц. Программа FilterLab — это только один из примеров программного обеспечения для расчёта фильтров, разработанного одним из производителей полупроводниковых устройств. Компании Texas Instruments, Linear Technology и Analog Devices имеют подобные программы, доступные через Интернет.

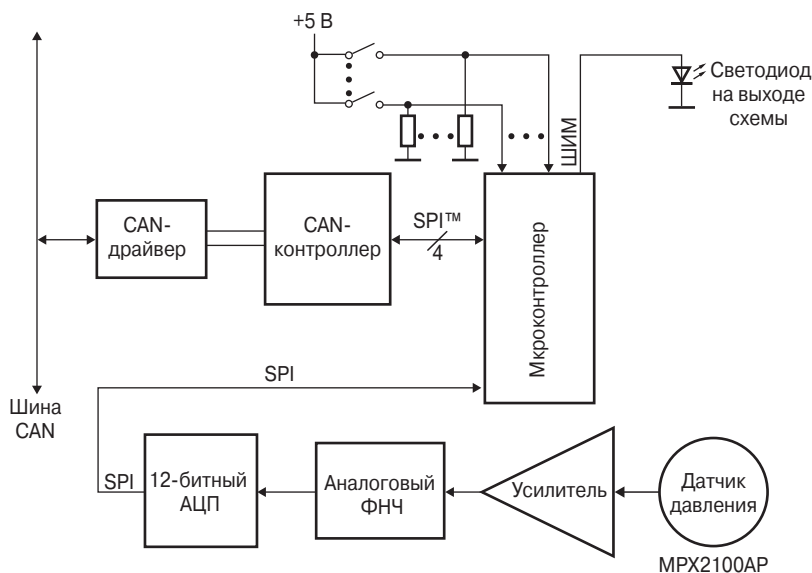
ределённым уровнем «интеллектуальности», соответствующим конкретной выполняемой функции, что позволяет упростить контроллер, управляющий этим блоком, и уменьшить число его внешних выводов. Кроме того, за счёт применения таких «интеллектуальных» распределённых по сети блоков, сеть CAN обладает повышенной надёжностью при одновременном уменьшении количества линий.

Возникает вопрос: «А какое отношение всё это имеет к аналоговым схемам?» Ответ будет коротким — самое непосредственное. Канал обмена данными и нужен только для того, чтобы передавать по нему оцифрованную аналоговую информацию от одного блока к другому.

На стенде выставки можно было наблюдать взаимодействие трёх блоков, связанных шиной CAN; в одном блоке выполнялось измерение температуры, затем полученное значение использовалось при калибровке датчика давления во втором блоке. Изменять давление можно было, сжимая воздушный шарик в блоке измерения давления (для удобства всё оборудование этой презентации было расположено в одном месте, чтобы посетители стенда могли сами оценить работу системы). Схема, входящая в состав датчика, оцифровывала уровень приложен-

ного давления и передавала данные по сети CAN в блок управления электродвигателем постоянного тока. Управление двигателем осуществлялось таким образом, чтобы повышение давления вызывало увеличение числа оборотов двигателя.

На **Рис. 1.3** показана базовая блок-схема с датчиком давления.



**Рис. 1.3.** Система на базе шины CAN содержит три блока, выполняющих различные функции по обработке аналоговых сигналов. Блоки, показанные на этом рисунке, измеряют давление, приложенное к воздушному шару, затем полученные данные пересылаются по сети CAN на схему управления двигателем постоянного тока в другом блоке (здесь не показан).

Кроме этих систем, компания Microchip демонстрировала ещё на трёх стендах примеры применения микроконтроллеров.

Давая шанс будущему инженеру как-то реабилитировать себя, я спросила: «Интересно, видите ли Вы в этом помещении что-нибудь, напоминающее аналоговое устройство?» Он внимательно осмотрел выставочный павильон. Я была немного удивлена, когда он с сочувствием посмотрел на меня и ответил: «Конечно, нет». Мне кажется, он подумал, что я немного старомодная и «не от мира сего». Он был уверен, что дал мне исчерпывающий и информативный ответ. Наверное, вы поняли, что его резюме было выброшено в корзину.

## 1.1. Цифровой метод измерения температуры

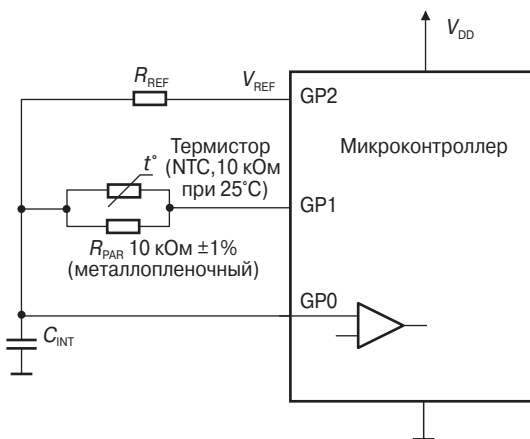
В данной книге не описываются методы ведения деловых переговоров, способы «зарабатывания очков» и продвижения по служебной лестнице. Эта книга посвящена всего лишь возможным методам разработки аналоговых схем, с которыми всё время приходится сталкиваться, и реализации таких методов в системах с однополярным питанием. В сущности, выпускник вуза в какой-то степени был

прав, поскольку цифровые решения внедряются и в большинство устройств аналоговой техники.

Попробуем, например, измерить температуру методами цифровой электроники. В этом случае простой аналого-цифровой преобразователь с низким разрешением можно легко заменить интегрирующей  $RC$ -цепью, присоединённой к порту ввода/вывода микроконтроллера. Переходная характеристика интегрирующей  $RC$ -цепи представляет собой нарастающую во времени функцию, поэтому для измерения напряжения входного сигнала микроконтроллер с помощью внутреннего таймера подсчитывает число миллисекунд, в течении которых напряжение на входе микроконтроллера достигнет порогового уровня.

Когда можно использовать подобный метод измерения температуры? Он подойдет, например, при использовании резистивного датчика температуры, изменяющего своё сопротивление при изменении температуры.

На **Рис. 1.4** показана принципиальная схема измерения температуры с помощью микроконтроллера. В начале цикла измерения выводы GP1 и GP2 конфигурируются как входы, кроме того, вывод GP0 конфигурируется как выход, на котором устанавливается напряжение НИЗКОГО уровня, чтобы разрядить конденсатор  $C_{INT}$ .



**Рис. 1.4.** Для сравнения постоянных времени двух цепей в схеме переключается опорное напряжение на выводах GP1 и GP2: одна цепь содержит параллельно соединённые термистор  $R_{NTC}$  с отрицательным коэффициентом сопротивления и стандартный резистор  $R_{PAR}$ , а также интегрирующий конденсатор  $C_{INT}$ , а вторая включает опорный резистор  $R_{REF}$  и тот же самый конденсатор  $C_{INT}$ .

В основе работы схемы измерения температуры, показанной на **Рис. 1.4**, лежит принцип поочередного заряда интегрирующего конденсатора  $C_{INT}$  через различные резисторы, подключённые к выводам GP1 и GP2 микроконтроллера, а разряжается конденсатор в обоих случаях через вывод GP0.

В начале работы выводы GP1 и GP2 конфигурируются как входы, а конденсатор  $C_{INT}$  разряжается через вывод GP0, сконфигурированный как выход с НИЗКИМ уровнем выходного напряжения. После разрядки конденсатора  $C_{INT}$  вывод

GP0 конфигурируется как вход, а вывод GP1 — как выход с ВЫСОКИМ уровнем напряжения. Таким образом, начинается заряд конденсатора  $C_{INT}$  через параллельно соединённые термистор и резистор  $R_{PAR}$ .

Внутренний таймер микроконтроллера подсчитывает интервал времени  $t_1$  (Рис. 1.5) до момента, когда в процессе заряда конденсатора  $C_{INT}$  через параллельно соединённые терморезистор  $R_{NTC}$  и резистор  $R_{PAR}$  напряжение на выводе GP0 достигнет порогового значения  $V_{TH}$ , соответствующего значению лог. 1.

Микроконтроллер фиксирует появление лог. 1 на входе GP0, затем конфигурирует выводы GP1 и GP2 как входы, а вывод GP0 — как выход с уровнем напряжения, соответствующего лог. 0. Конденсатор  $C_{INT}$  быстро разряжается через GP0, после чего микроконтроллер конфигурирует вывод GP0 как вход, а вывод GP2 — как выход с ВЫСОКИМ уровнем напряжения.

Конденсатор  $C_{INT}$  вновь начинает заряжаться, но теперь уже через резистор  $R_{REF}$ , а таймер подсчитывает интервал времени до момента переключения GP0 снова в состояние лог. 1 (этот интервал обозначен на Рис. 1.5 как  $t_2$ ).

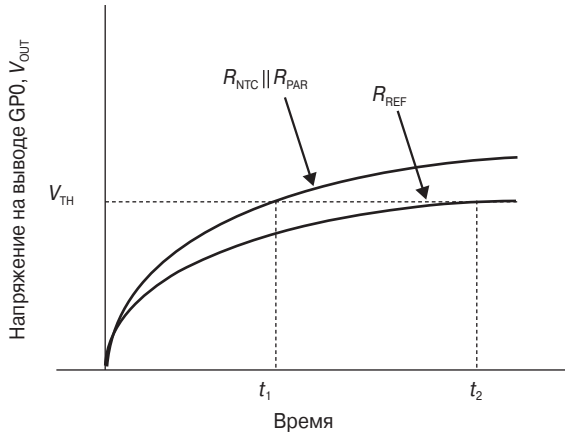


Рис. 1.5. По переходной характеристике  $RC$ -цепи, показанной на Рис. 1.4, с помощью внутреннего счётчика микроконтроллера можно определить относительное сопротивление терморезистора с отрицательным температурным коэффициентом.

Время интегрирования  $RC$ -цепи можно вычислить по формуле:

$$V_{OUT} = V_{REF} (1 - e^{-t/RC})$$

или

$$t = RC \ln(1 - V_{TH}/V_{REF}),$$

где  $V_{OUT}$  — напряжение на выводе GP0,

$V_{REF}$  — выходное напряжение ВЫСОКОГО логического уровня на выводах в GP1 или GP2,

$V_{TH}$  — входное пороговое напряжение GP0, соответствующее лог. 1.

Если отношение напряжений  $V_{TH}/V_{REF}$  является константой, то неизвестное значение сопротивления параллельно соединённых резисторов  $R_{NTC}$  и  $R_{PAR}$  можно вычислить по формуле:

$$R_{NTC} \parallel R_{PAR} = R_{REF} (t_2/t_1).$$

Обратите внимание, что в этой формуле вычисленное значение сопротивлений включённых параллельно резисторов  $R_{NTC}$  и  $R_{PAR}$  не зависит от ёмкости конденсатора  $C_{INT}$ . Точность этих резисторов влияет на абсолютную точность измерения.

Думаю, кандидат в инженеры, встретившийся мне на выставке, всё-таки не прав — аналоговая электроника никогда не исчезнет, и специалист по цифровой технике всё также будет бороться с проблемами, возникающими в аналоговых схемах. Дело в том, что аналоговое схемотехническое решение во много раз эффективнее и, как правило, точнее, чем цифровое. Например, точность результатов предыдущей измерительной  $RC$ -цепи определяется разрядностью таймера, частотой тактового генератора микроконтроллера и допустимой погрешностью резисторов.

## 1.2. Проблемные вопросы

Мне пришлось работать со многими разработчиками аналоговой и цифровой электроники, каждый из которых имел собственные взгляды и объяснение причин своих неудач, но здесь я хочу привести некоторые утверждения моих заказчиков, занимающихся цифровыми схемами, относительно проблем с аналоговыми системами.

### 1.2.1. Это не моя работа!

Данное утверждение поражает удивительной простотой и звучит примерно так: «Сотрудники моего отдела избегают применять в своих разработках аналоговые схемы везде, где только возможно, невзирая на степень их значения для разработки. Многие из них по собственному опыту знают, что предсказать поведение аналоговых схем очень сложно, поэтому практически любой инженер попытается найти прототип аналоговой схемы, которую он разрабатывает. Если поиск прототипа схемы или её части заканчивается неудачей, то разработчики обычно пытаются вспомнить, чему их учили в университете, но вот в чём проблема — в то время их обучали только методам цифровой электроники».

Хорошее оправдание. Следуя ему, можно придти к заключению, что «закоренелый» инженер-цифровик интересуется вовсе не тем, как добраться из точки А в точку В, а только тем, что на эту тему написано в книге «схемотехнических рецептов».

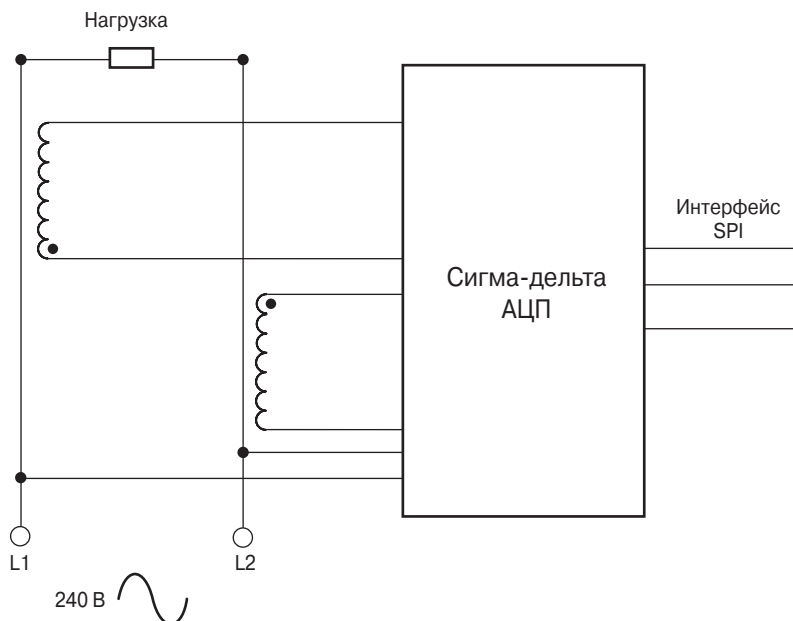
В конце концов, оказывается, что такие инженеры чем-то напоминают плотника с молотком, который ищет гвоздь. Обнаружив подходящее, на его взгляд, схемотехническое решение, такой разработчик пытается как-то приспособить его к своей задаче. Одним из наглядных примеров применения готового схемотехнического решения там, где оно подходит меньше всего, — попытка применить стандартный 12-битный аналого-цифровой преобразователь последовательного приближения (АЦП ПП) в электронных датчиках измерения электрической



мощности, хотя в таком приложении на самом деле нужно использовать только сигма-дельта-преобразователь.

Далее в этой книге (Глава 3) будет показано, что сигма-дельта ( $\Sigma$ - $\Delta$ ) преобразователь может обеспечить уровень разрешения в диапазоне долей нВ, что даёт определённые преимущества, например позволяет исключить из схемы каскад усиления аналогового сигнала и одновременно уменьшить шум в полосе пропускания вашего сигнала.

На **Рис. 1.6** показан способ измерения электрической мощности.



**Рис. 1.6.** Для измерения электрической мощности требуется максимум 12-битный АЦП. На первый взгляд кажется, что для реализации такой схемы можно использовать 12-битный АЦП последовательного приближения, но это не так. Значение младшего значащего бита (LSB) в такой схеме должно быть намного меньше значения, которое способен обеспечить АЦП последовательного приближения, поэтому в таких случаях чаще используется сигма-дельта-преобразователь.

В этой схеме ток, протекающий в цепи, определяется с помощью катушки индуктивности, подключённой к слаботочной цепи нагрузки, что даёт в результате небольшое падение напряжения на чувствительном элементе.

### 1.2.2. Подскажите, в чём дело

Однажды разработчик цифровых устройств сказал мне: «Слава богу, наконец-то я понял, как работать с аналоговыми схемами. Теперь можно опять вернуться к своим цифровым разработкам. Спасибо за ценный совет».

Мой совет тому инженеру не был чем-то из ряда вон выходящим, просто он касался двух основных параметров операционного усилителя, которые используются при проектировании аналогового фильтра нижних частот (см. произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания и скорость нарастания выходного напряжения в разделе 4.4).

Произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания, которое мы далее сокращённо будем называть GBWP (Gain BandWidth Product) — это числовой коэффициент, определяющий полосу пропускания операционного усилителя (ОУ) с замкнутой цепью обратной связи (ОС). Данный параметр обязательно включается в таблицу параметров каждого операционного усилителя и, чтобы быстро его обнаружить среди 30 или 40 позиций, нужно просмотреть колонку «Единицы измерения», которая обычно находится в правой части таблицы.

При поиске GBWP посмотрите на единицы измерения, выраженные в герцах (Гц), килогерцах (кГц) или мегагерцах (МГц) и, если обнаружите что-то похожее, проверьте, описанию какого параметра в левой части таблицы они соответствуют. Ещё раз убедитесь, что правильно поняли условия, при которых проверяется данный параметр, а также обратите внимание и на общие условия измерения ОУ, которые приводятся в верхней части данной таблицы. На **Рис. 1.7** стрелками обозначены все поля типичной таблицы параметров.

**Электрические параметры по переменному току**

Электрические параметры измерены при  $T_A = +25^\circ\text{C}$ ,  $V_{DD} = +1.8...5.5\text{ В}$ ,  $V_{SS} = \text{GND}$ ,  $V_{CM} = V_{DD}/2$ ,  $V_{OUT} = V_{DD}/2$ ,  $C_L = 60\text{ пФ}$ ,  $R_L = 10\text{ кОм}$  при  $V_{DD}/2$ , если не указано иное

Параметры	Обозн.	Мин.	Тип.	Макс.	Ед. изм.	Условия изм.
<b>Характеристики по переменному току</b>						
Произведение коэффициента усиления на ширину полосы пропускания	GBWP	—	1.0	—	МГц	
Запас по фазе	PM	—	90	—	град.	$G = +1$
Скорость нарастания вых. напряжения	SR	—	0.6	—	В/мкс	
<b>Шум</b>						
Напряжение шумов на входе	$E_{ni}$	—	6.1	—	мкВ(р-р)	$f = 0.1...10\text{ Гц}$
Плотность напряжения шумов на входе	$e_{ni}$	—	28	—	нВ·Гц <sup>1/2</sup>	$f = 1\text{ кГц}$
Плотность тока шумов на входе	$i_{ni}$	—	0.6	—	фА·Гц <sup>1/2</sup>	$f = 1\text{ кГц}$

**Рис. 1.7.** Типичная таблица электрических параметров для операционного усилителя, включающая семь колонок. Для быстрого поиска какого-либо параметра можно использовать колонку «Единица измерения».

Параметр GBWP можно определить и из рабочей характеристики, приведённой далее в документации на устройство (см. **Рис. 1.8**). Эту характеристику обычно называют зависимостью коэффициента усиления при разомкнутой цепи обратной связи (ОС) от частоты или амплитудной характеристикой. На этом же графике иногда показывают и зависимость фазового сдвига от частоты (фазовая характеристика). Как правило, точка пересечения амплитудной характеристики и горизонтальной прямой, соответствующей коэффициенту усиления 0 дБ, обычно соответствует значению GBWP, указанному в таблице параметров.