

УДК 004.32  
ББК 32.973  
Б79

**Болл Стюарт Р.**

**Б79** Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров. — М.: ДМК Пресс, 2017.—354 с.: ил. (Серия «Программируемые системы»).

ISBN 978-5-97060-526-4

Данное издание является практическим пособием по применению различных интерфейсов для подключения аналоговых периферийных устройств к компьютерам, микропроцессорам и микроконтроллерам. Раскрывается специфика применения таких интерфейсов, как I<sup>2</sup>C, SPI/Microware, SMBus, RS-232/485/422, токовая петля 4-20 мА и др. Дается обзор большого количества современных датчиков: температурных, оптических, ПЗС, магнитных, тензодатчиков и т. д. Подробно описываются контроллеры, АЦП и ЦАПы, их элементы — УВХ, ИОН, кодеки, энкодеры. Рассмотрены исполнительные устройства — двигатели, терморегуляторы — и вопросы их управления в составе систем автоматического управления различного типа (релейного, пропорционального и ПИД). Книга снабжена иллюстрациями, наглядно представляющими аппаратные и программные особенности применения элементов аналоговой и цифровой техники.

Заинтересует не только начинающих радиолюбителей, но и специалистов, имеющих стаж работы с аналоговой и цифровой техникой, а также студентов технических колледжей и вузов.

УДК 004.32  
ББК 32.973

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

Настоящее издание «Аналоговые интерфейсы микроконтроллеров» Стюарта Болла Р. выполнено по договору с Elsevier Inc., 200 Wheeler Road, 6th Floor, Burlington, MA01803, USA.

ISBN 0-7506-7723-6 (англ.)  
ISBN 978-5-94120-142-6 (Додэка)  
ISBN 978-5-97060-526-4 (ДМКПресс)

© Elsevier Science (USA)  
© Макет, Издательский дом «Додэка-XXI»  
© Издание, ДМК Пресс, 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Принятые сокращения .....	12
Предисловие .....	13
Введение .....	14
<b>Глава 1. Параметры системы .....</b>	<b>15</b>
1.1. Динамический диапазон .....	15
1.2. Точность измерения напряжения .....	16
1.3. Калибровка .....	16
1.4. Пропускная способность шины .....	19
1.5. Производительность процессора .....	20
1.5.1. Прерывания .....	21
1.5.2. Интерфейсы .....	21
1.5.3. Поддержка на аппаратном уровне .....	21
1.5.4. Требования к процессору .....	22
1.5.5. Требования к операционной системе .....	22
1.5.6. Язык программирования и компилятор .....	22
1.6. Ограничение скорости .....	22
1.6.1. Затраты .....	23
1.6.2. Электромагнитная совместимость .....	23
1.7. Другие системные ограничения .....	24
1.7.1. Периферийные устройства .....	24
1.7.2. Общие интерфейсы .....	24
1.7.3. Приоритет задач .....	24
1.7.4. Системные требования .....	25
1.7.5. Разрядность цифрового слова .....	27
1.7.6. Интерфейсы .....	27
1.8. Частота дискретизации и наложение .....	27
<b>Глава 2. Аналого-цифровые преобразователи .....</b>	<b>30</b>
2.1. Общие сведения .....	30
2.2. Описание АЦП .....	32
2.2.1. Опорное напряжение .....	33
2.2.2. Выходное слово .....	33

2.2.3. Разрешение	33
2.3. Типы АЦП	34
2.3.1. Следящий АЦП	34
2.3.2. Параллельный АЦП	36
2.3.3. АЦП последовательных приближений	37
2.3.4. АЦП двойного интегрирования	38
2.3.5. Сигма-дельта АЦП	40
2.3.6. Составной АЦП	43
2.4. Сравнение типов АЦП по основным показателям	44
2.5. Устройства выборки-хранения	45
2.6. Реальные компоненты	48
2.6.1. Входные уровни	48
2.6.2. Встроенный источник опорного напряжения	49
2.6.3. Дополнительная емкость на входе опорного напряжения	49
2.6.4. Встроенное УВХ	49
2.7. Интерфейс микропроцессора	49
2.7.1. Кодирование выходного слова	49
2.7.2. Параллельный интерфейс	50
2.7.3. Время доступа	52
2.7.4. Выход BUSY	54
2.7.5. Время освобождения шины	54
2.7.6. Связь сигналов шины управления с АЦП	55
2.7.7. Задержка между преобразованиями	55
2.7.8. Величина погрешности преобразования	56
2.8. Синхронные интерфейсы	56
2.9. Последовательные интерфейсы	58
2.9.1. Периферийный последовательный интерфейс SPI/Microwire	58
2.9.2. Шина I <sup>2</sup> C	61
2.9.3. Шина SMBus	63
2.9.4. Специализированные последовательные интерфейсы	64
2.10. Многоканальные АЦП	65
2.11. Встроенные в микроконтроллер АЦП	65
2.12. Кодеки	67
2.13. Прерывания	67
2.14. Многофункциональные выводы микроконтроллеров	68
2.15. В рабочую тетрадь разработчика	70
<b>Глава 3. Датчики</b>	71
3.1. Температурные датчики	71
3.1.1. Терморезисторы	71
3.1.2. Масштабирование	75
3.1.3. Влияние разброса параметров компонентов	79

3.1.4. Резистивные температурные датчики	81
3.1.5. Термопары	81
3.1.6. Полупроводниковые температурные датчики	84
3.2. Оптические датчики	85
3.2.1. Щелевой оптрон	85
3.2.2. Отражательный оптрон	85
3.2.3. Особенности работы в ИК-диапазоне	88
3.2.4. Механическая нестабильность	90
3.2.5. Датчик защитного кожуха	91
3.2.6. Управление несколькими датчиками	92
3.2.7. Оптрон с закрытым оптическим каналом	94
3.2.8. Дискретные оптические датчики	96
3.3. Приборы с зарядовой связью	99
3.3.1. Основы работы ПЗС	99
3.3.2. Управление экспозицией	101
3.3.3. ПЗС-линейки	101
3.3.4. Распознавание цвета	103
3.3.5. Трехлинейные ПЗС	104
3.3.6. Методы цветовой обработки	106
3.3.7. Чувствительная площадь ПЗС-матрицы	106
3.3.8. Темновой заряд	107
3.3.9. Двойная коррелированная выборка	107
3.3.10. Неравномерность	108
3.3.11. Питание ПЗС	110
3.3.12. АЦП ПЗС	110
3.4. Датчики магнитного поля	110
3.4.1. Датчики Холла	110
3.4.2. Линейные дифференциальные трансформаторы	113
3.4.3. Датчики с переменным магнитным сопротивлением	114
3.5. Полупроводниковые тензодатчики движения/ускорения	116
3.6. Металлические тензодатчики веса/силы	117
3.7. Ключи	119
<b>Глава 4. Измерение временных параметров</b>	<b>121</b>
4.1. Общие сведения	121
4.2. Измерение периода или частоты	125
4.3. Смещение частот	127
4.4. Преобразователи напряжение-частота	129
4.4.1. Применение ПНЧ	130
4.4.2. Фильтрация	131
4.5. Тактовая частота и диапазон	131
4.6. Увеличение точности при ограниченном разрешении	133

<b>Глава 5. Методы управления</b> .....	139
5.1. Управление с разомкнутой петлей обратной связи .....	139
5.2. Отрицательная обратная связь .....	139
5.3. Микропроцессорные системы управления .....	140
5.4. Система релейного управления .....	141
5.5. Температурный перегрев .....	144
5.6. Система пропорционального управления .....	144
5.7. Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление .....	148
5.7.1. Вклад операции дифференцирования в алгоритм управления .....	151
5.7.2. Вклад операции интегрирования в алгоритм управления .....	153
5.7.3. ПИД-управление в целом .....	155
5.7.4. Способы применения системы ПИД-управления .....	156
5.7.5. Насыщение .....	157
5.7.6. Программное обеспечение .....	159
5.7.7. Временная задержка .....	159
5.7.8. Резкие изменения сигнала .....	160
5.7.9. Специальные требования .....	161
5.8. Управление двигателем .....	161
5.8.1. Пример постоянной скорости вращения круговой карусели .....	163
5.8.2. Позиционирование .....	165
5.8.3. Программное обеспечение .....	167
5.9. Управление с предсказанием .....	168
5.10. Измерение и анализ реакции петли обратной связи .....	169
5.10.1. Логический анализатор/Цифровой осциллограф .....	170
5.10.2. Измерение параметров двигателя .....	171
5.10.3. Доступное программное обеспечение .....	173
5.11. Примеры программирования ПИД-систем .....	173
5.11.1. Основная петля ПИД-управления .....	173
5.11.2. Функция запрета первоначального действия .....	174
5.11.3. Фильтрация входного шума .....	174
5.11.4. Предотвращения выхода управляющего параметра за допустимые пределы .....	175
5.11.5. Предотвращение выхода управляющего параметра за пределы средней величины .....	176
5.11.6. Реализация данных примеров .....	177
5.12. В рабочую тетрадь разработчика .....	178
<b>Глава 6. Соленоиды, реле и другие исполнительные устройства</b> .....	179
6.1. Соленоиды .....	179
6.1.1. Реле .....	179
6.1.2. Интерфейс соленоидов и реле .....	180
6.1.3. Включение/удержание реле .....	182
6.2. Нагревательные элементы .....	185

6.2.1. Обрыв нагревателя	186
6.2.2. Обрыв датчика	187
6.2.3. Нагреватель на основе термометра сопротивления	188
6.3. Охладители	191
6.3.1. Охладитель Пельтье	191
6.3.2. Вентиляторы	191
6.4. Светодиоды	193
6.4.1. Оптроны с закрытыми оптическими каналами	195
6.4.2. Одновременное включение нескольких светодиодов	196
6.5. ЦАП	198
6.6. Цифровые потенциометры	199
6.7. Аналоговые ключи	202
6.7.1. Типы аналоговых ключей	204
6.7.2. Применение аналоговых ключей	204
6.7.3. Мультиплексоры	205
<b>Глава 7. Двигатели</b>	<b>206</b>
7.1. Шаговые двигатели	206
7.1.1. Биполярные и однополярные шаговые двигатели	208
7.1.2. Резонанс	210
7.1.3. Полушаговый режим двигателя	211
7.1.4. Микрошаговый режим двигателя	214
7.1.5. Управление шаговым двигателем	215
7.1.6. Сквозной ток	216
7.1.7. Контроль тока	220
7.1.8. ИС управления двигателем	221
7.1.9. Управление по методу прерывания	222
7.1.10. Методы управления и резонанс	224
7.1.11. Линейное управление	225
7.2. Двигатели постоянного тока	226
7.2.1. Управление двигателями постоянного тока	227
7.2.2. Бесколлекторные двигатели постоянного тока	230
7.2.3. Энкодеры	234
7.2.4. ИС контроллеров двигателей постоянного тока	237
7.2.5. Программируемые контроллеры	242
7.3. Достоинства и недостатки различных типов двигателей	244
7.4. Порядок включения питания логических цепей и двигателя	246
7.5. Вращающий момент двигателя	248
7.5.1. Вращающий момент при заторможенном двигателе	248
7.5.2. Противодействующее электромагнитное поле	248
7.5.3. Вращающий момент и скорость	248
7.6. Реальное применение шагового двигателя	249

<b>Глава 8. Электромагнитные помехи</b>	254
8.1. Связь по земле	254
8.1.1. Ток двигателя	258
8.1.2. Самонаведенные токовые ошибки	259
8.2. Электростатический разряд	260
8.2.1. Самонаведенный электростатический разряд	260
8.2.2. Защита от электростатического разряда	261
<b>Глава 9. Системы высокой точности</b>	264
9.1. Общие сведения	264
9.2. Входное напряжение смещения	266
9.3. Входное сопротивление	267
9.4. Частотные характеристики	268
9.5. Влияние температуры на сопротивление резисторов	269
9.6. Источник опорного напряжения	270
9.7. Влияние изменения температуры в целом	272
9.8. Заземление и шумы	273
9.9. Печатная плата	275
9.9.1. Заземление на печатной плате	275
9.9.2. Источник питания	277
9.10. Статистическая погрешность	278
9.11. Опорное напряжение от источника питания	280
9.12. Резюме	280
<b>Глава 10. Стандартные интерфейсы</b>	281
10.1. Интерфейс IEEE 1451.2	281
10.1.1. Электрические параметры	281
10.1.2. Параметры датчиков	282
10.1.3. Международная система единиц измерения СИ	282
10.2. Последовательный периферийный интерфейс токовая петля 4-20 мА	283
10.3. Интерфейс Fieldbus	283
<b>Глава 11. Аналоговая схемотехника</b>	286
11.1. Питание микроконтроллера и напряжение смещения	286
11.2. Наборы резисторов	288
11.3. Многоходовые системы управления	289
11.4. Управление цепями переменного тока	291
11.5. Схемы контроля напряжения питания	293
11.6. Управление биполярными транзисторами	294
11.6.1. Преобразование логических уровней	296
11.6.2. Скорость переключения	296
11.6.3. Высоковольтные ключи	297
11.7. МОП-транзисторы	297

11.7.1. Управление МОП-транзисторами . . . . .	297
11.7.2. МОП-транзистор для коммутации . . . . .	299
11.8. Измерение параметров сигнала отрицательной полярности . . . . .	301
11.9. Пример системы управления . . . . .	302
11.9.1. Релейное управление . . . . .	305
11.9.2. Пропорциональное управление . . . . .	305
11.9.3. ПИД-регулирование . . . . .	309
11.9.4. Пропорционально-интегральное управление . . . . .	313
<i>Приложение А. Операционные усилители . . . . .</i>	<i>314</i>
<i>Приложение Б. Широтно-импульсная модуляция . . . . .</i>	<i>326</i>
<i>Приложение В. Полезные сайты в Интернете . . . . .</i>	<i>339</i>
<i>Приложение Г. Программа Python для главы 11. Данные Excel для главы 4 . . . . .</i>	<i>340</i>
Словарь терминов . . . . .	345
Предметный указатель . . . . .	348