

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b> . . . . .	9
<b>Глава 1. Из чего состоит МК</b>	
1.1. Загадки терминологии . . . . .	13
1.2. Историческая справка . . . . .	16
1.3. Обновлённая классификация МК . . . . .	19
1.4. Микроконтроллерные новости . . . . .	21
1.4.1. Мультиядерные МК . . . . .	21
1.4.2. Гибкие МК . . . . .	22
1.4.3. МК с сегнетоэлектрической памятью FRAM . . . . .	22
1.4.4. Беспроводные МК . . . . .	24
1.4.5. 32-битные МК начального уровня . . . . .	25
1.4.6. Клонирование МК . . . . .	26
1.5. Мотивация в изучении МК . . . . .	27
1.6. Какой МК выбрать? . . . . .	29
1.7. Внутреннее устройство МК . . . . .	31
1.7.1. Обновлённая структурная схема МК . . . . .	31
1.7.2. Центральное вычислительное устройство . . . . .	32
1.7.3. Память ОЗУ . . . . .	32
1.7.4. Память ПЗУ . . . . .	33
1.7.5. Подсистема прерываний . . . . .	33
1.7.6. Подсистема интерфейсов . . . . .	34
1.7.7. Подсистема программирования . . . . .	35
1.7.8. Подсистема питания . . . . .	36
1.7.9. Подсистема начального сброса . . . . .	38
1.7.10. Подсистема тактирования . . . . .	40
1.7.11. Подсистема портов ввода/вывода . . . . .	42
1.8. Условные обозначения на схемах с идеализированным МК . . . . .	48
Список использованных источников и литературы к главе 1 . . . . .	54

**Глава 2. Типовые схемы узлов ввода МК**

2.1. Приём аналоговых и цифровых сигналов . . . . .	55
2.1.1. Приём сигналов низкого напряжения . . . . .	55
2.1.2. Приём сигналов высокого напряжения . . . . .	57
2.1.3. Внутренний аналоговый компаратор . . . . .	60
2.2. Входные усилители сигналов . . . . .	62
2.2.1. Усилители на транзисторах и микросхемах . . . . .	62
2.2.2. Трансформаторная развязка . . . . .	64
2.3. Механические датчики . . . . .	65
2.3.1. Энкодеры . . . . .	65
2.3.2. Кнопки, переключатели . . . . .	66
2.3.3. Датчики вибрации . . . . .	67
2.4. Акустические датчики. . . . .	69
2.4.1. Микрофоны и громкоговорители . . . . .	69
2.5. Оптические датчики. . . . .	70
2.5.1. Дискретные фотодатчики . . . . .	70
2.5.2. Интегральные фотомодули. . . . .	71
2.5.3. Оптопары . . . . .	73
2.5.4. Датчики с открытым оптическим каналом . . . . .	74
2.6. Температурные датчики. . . . .	75
2.6.1. Терморезисторы . . . . .	75
2.6.2. Термопары . . . . .	77
2.6.3. Интегральные термодатчики. . . . .	78
2.7. Погодные датчики . . . . .	78
2.7.1. Датчики атмосферного давления . . . . .	78
2.8. Прочие схемы узлов ввода . . . . .	80
Список использованных источников и литературы к главе 2 . . . . .	84

**Глава 3. Типовые схемы узлов управления и тактирования**

3.1. Формирователи сигнала начального сброса . . . . .	87
3.2. Внешние источники опорного напряжения. . . . .	90
3.3. Стабилизация тактовой частоты. . . . .	91
3.4. Приём тактовых сигналов . . . . .	92
3.5. Прочие схемы тактирования . . . . .	93
Список использованных источников и литературы к главе 3 . . . . .	94

**Глава 4. Типовые схемы подачи питания на МК**

4.1. Параметрические стабилизаторы напряжения . . . . .	95
4.2. Линейные интегральные стабилизаторы. . . . .	96
4.3. Импульсные DC/DC-преобразователи напряжения. . . . .	97
4.4. «Импульсно-линейные» источники питания . . . . .	98
4.5. Электронное включение/выключение питания . . . . .	99
4.6. Фильтрация питания . . . . .	102
4.7. Прочие схемы организации питания . . . . .	103
Список использованных источников и литературы к главе 4 . . . . .	106

**Глава 5. Типовые схемы узлов вывода МК**

5.1. Светодиодные индикаторы . . . . .	108
5.1.1. Одиночные светодиоды . . . . .	108
5.1.2. Сокращение числа соединительных линий . . . . .	110
5.1.3. Одиночные светодиоды с буферными элементами . . . . .	111
5.1.4. Цепочки светодиодов . . . . .	114
5.1.5. Линейки светодиодов . . . . .	115
5.1.6. Светодиодные матрицы . . . . .	116
5.1.7. Двухцветные светодиоды . . . . .	119
5.1.8. Трёхцветные светодиоды . . . . .	120
5.1.9. ИК-светодиоды . . . . .	121
5.1.10. Многоразрядные семисегментные индикаторы . . . . .	122
5.1.11. Уплотнение сигналов в семисегментных индикаторах . . . . .	124
5.1.12. Буквенно-цифровые индикаторы . . . . .	126
5.1.13. Алфавитно-цифровые OLED-модули . . . . .	127
5.1.14. Цветные OLED-дисплеи . . . . .	131
5.1.15. Лазерные излучатели . . . . .	132
5.1.16. Мигающие светодиоды . . . . .	134
5.1.17. Излучатели внутри оптопар . . . . .	134
5.2. Накальные и газоразрядные индикаторы . . . . .	138
5.2.1. Электрические лампы накаливания . . . . .	138
5.2.2. Ваккумные индикаторы семейства Nixie . . . . .	141
5.2.3. Низковольтные люминесцентные вакуумные индикаторы . . . . .	143
5.2.4. Прочие газоразрядные индикаторы . . . . .	144
5.3. Жидкокристаллические индикаторы . . . . .	146
5.3.1. Семисегментные ЖКИ . . . . .	146
5.3.2. Алфавитно-цифровые ЖК-модули (АЦЖК) . . . . .	146
5.3.3. ЖК-дисплеи . . . . .	151
5.4. Звуковая система . . . . .	152
5.4.1. Ультразвуковые излучатели . . . . .	152
5.4.2. Транзисторные усилители звука . . . . .	153
5.4.3. Интегральные усилители звука . . . . .	155
5.4.4. Генерация звука через ШИМ . . . . .	156
5.4.5. Генерация звука через ЦАП . . . . .	158
5.4.6. Формирование огибающей . . . . .	159
5.5. Ключевые узлы . . . . .	160
5.5.1. Транзисторные ключи . . . . .	160
5.5.2. Узлы управления параметрами . . . . .	162
5.6. Электродвигатели . . . . .	163
5.6.1. Транзисторное управление двигателями . . . . .	163
5.6.2. Управление двигателями через мостовые схемы . . . . .	166
5.6.3. Микросхемы управления двигателями . . . . .	168
5.6.4. Шаговые двигатели . . . . .	170
5.6.5. Серводвигатели . . . . .	171

5.7. Генерация, модуляция, переключение сигналов . . . . .	172
5.7.1. Формирование телевизионных сигналов . . . . .	172
5.7.2. Коммутация сигналов с участием МК . . . . .	176
5.7.3. Подключение ЭРИ к внешнему тракту. . . . .	177
5.7.4. Генерация сигналов . . . . .	178
5.8. Силовая электроника . . . . .	180
5.8.1. Элементы Пельтье . . . . .	180
5.8.2. Механические реле общего применения. . . . .	181
5.9. Прочие схемы узлов вывода . . . . .	182
Список использованных источников и литературы к главе 5 . . . . .	187
<b>Глава 6. Типовые схемы комбинированных узлов ввода/вывода</b>	
6.1. Информационно-измерительные узлы . . . . .	194
6.2. Схемы с программной обратной связью . . . . .	197
6.3. Подключение внешних АЦП . . . . .	199
6.4. Опрос состояния кнопок и переключателей . . . . .	200
6.5. Опрос тастатуры . . . . .	202
6.6. Сокращение числа линий при опросе кнопок . . . . .	204
6.7. Измерение частоты . . . . .	207
6.8. Светоизлучатели и фотоприёмники . . . . .	207
6.9. Датчики со знакопеременным напряжением . . . . .	209
6.10. Прочие схемы узлов ввода/вывода. . . . .	211
Список использованных источников и литературы к главе 6 . . . . .	216
<b>Глава 7. Типовые схемы интерфейсных узлов</b>	
7.1. СОМ-порт . . . . .	218
7.2. Интерфейс USB . . . . .	220
7.3. Интерфейс CAN . . . . .	222
7.4. Интерфейс «1-Wire». . . . .	223
7.5. Интерфейс «K-Line». . . . .	224
7.6. Интерфейс I <sup>2</sup> C . . . . .	226
7.7. Интерфейсы UART/USART . . . . .	230
7.8. Интерфейс RS-485. . . . .	232
7.9. Интерфейс «Токсовая петля» . . . . .	235
7.10. Часы реального времени RTC . . . . .	236
7.11. Интерфейс SPI . . . . .	238
7.12. Интерфейс карт памяти MMC/SD . . . . .	241
7.13. Работа с навигационными модулями GPS . . . . .	246
7.14. Интерфейс MIDI . . . . .	248
7.15. Интерфейс S/PDIF. . . . .	251
7.16. Прочие интерфейсы . . . . .	252
Список использованных источников и литературы к главе 7 . . . . .	256
<b>Глава 8. Типовые схемы автономных устройств</b>	
8.1. Микроконтроллерные модули питания . . . . .	259
8.2. Встраиваемые микроконтроллерные узлы. . . . .	260
8.3. Измерительные устройства. . . . .	262

8.4. Самостоятельно значимые устройства . . . . .	267
8.5. Вблизи от терменвокса . . . . .	271
8.6. Устройства автоматики . . . . .	274
8.7. Дорабатываемые устройства . . . . .	275
Список использованных источников и литературы к главе 8 . . . . .	277
<b>Глава 9. Схемы для Arduino</b>	
9.1. Кратко про Arduino . . . . .	280
9.1.1. Постановка задачи. . . . .	280
9.1.2. На кого рассчитан проект Arduino? . . . . .	281
9.1.3. Платформа «Open» . . . . .	281
9.1.4. Историческая справка . . . . .	283
9.1.5. Особенности Arduino . . . . .	283
9.1.6. Тестовая проверка Arduino . . . . .	285
9.1.7. Философия Arduino . . . . .	291
9.2. Схемы подключения Arduino . . . . .	291
9.2.1. Схемы с цифровыми входами . . . . .	292
9.2.2. Схемы с аналоговыми входами . . . . .	294
9.2.3. Схемы цифровых выходов . . . . .	297
9.2.4. Схемы аналоговых выходов . . . . .	300
9.2.5. Комбинированные схемы со входами и выходами . . . . .	303
9.2.6. Конструкции на базе Arduino . . . . .	306
Список использованных источников и литературы к главе 9 . . . . .	309
<b>Глава 10. Схемы, не рекомендуемые к применению</b>	
10.1. О достижении цели. . . . .	311
10.2. Примеры анализа электрических схем . . . . .	312
10.2.1. Разноцветный «светодинамик» . . . . .	312
10.2.2. Помехи в канале АЦП . . . . .	313
10.2.3. Внешняя нагрузка на выходе Arduino . . . . .	314
10.2.4. Arduino в качестве конвертора USB-UART. . . . .	316
Список использованных источников и литературы к главе 10 . . . . .	318
<b>Глава 11. Среда моделирования Micro-Cap</b>	
11.1. Компьютерное моделирование. . . . .	319
11.2. Micro-Cap: ограничения, версии, установка . . . . .	323
11.3. Технология рисования схем в Micro-Cap . . . . .	326
11.4. Базовые логические элементы . . . . .	329
11.4.1. Схема замещения КМОП-инвертора . . . . .	329
11.4.2. Компоненты замещения из библиотеки Micro-Cap . . . . .	330
11.4.3. Схема замещения КМОП-триггера Шмитта. . . . .	331
11.4.4. Схема замещения КМОП-инвертора с регулируемыми фронтами. . . . .	332
11.4.5. Моделирование аналоговых входов/выходов МК. . . . .	334
11.4.6. Модели в формате IBIS . . . . .	335
11.4.7. Текстовая макромодел и инвертора для МК . . . . .	336
11.4.8. Экспериментальное уточнение параметров макромодел и . . . . .	338

11.5. Моделирование подсистем МК . . . . .	341
11.5.1. Моделирование подсистемы питания. . . . .	341
11.5.2. Моделирование подсистемы начального сброса . . . . .	342
11.5.3. Моделирование подсистемы тактирования . . . . .	343
11.5.4. Моделирование подсистемы портов ввода/вывода . . . . .	344
Список использованных источников и литературы к главе 11 . . . . .	346
<b>Послесловие.</b> . . . . .	347
<b>Приложения</b>	
Приложение 1. Ссылки и адреса в Интернете . . . . .	349
Приложение 2. Список аббревиатур. . . . .	353

# ВВЕДЕНИЕ

*Человек вырастает по мере того, как растут его цели  
(Фридрих Шиллер)*

Эта книга предназначена в первую очередь для электронщиков, а каждый электронщик в душе немного «Художник», немного «Трудыга», немного «Прагматик» и немного «Альтруист».

«Художник» подталкивает человека к поиску нестандартных способов решения сложных проблем, к изобретению новых электрических схем, к изучению новых языков программирования. Он даёт творческие силы, вдохновение и желание создавать то, чего раньше никто не делал, а также придумывать то, до чего раньше никто не смог додуматься.

К сожалению, гениальные идеи и озарение иногда уводят в сторону от простых и ясных решений, а отсутствие похвалы может отбить охоту к творчеству. Тем не менее художественная жилка заставляет электронщика ювелирно подстраивать электрические параметры с точностью до милливольт, красиво рисовать электрические схемы, симметрировать проводники на печатной плате, оптимизировать «до байта» программный код и писать подробные комментарии в листингах. Награда за лишнюю трату времени — глубокое моральное удовлетворение от проделанной работы.

«Трудыга» просыпается в человеке тогда, когда приходится действовать в единой команде под общим началом. Здесь не столь важно, какую именно часть изделия предстоит спроектировать. Главное, успеть в срок, не подвести товарищей. А для этого можно допоздна посидеть с паяльником в руках над макетной платой, ещё раз дотошно перепроверить результаты измерений, протестировать программу на устойчивость к воздействию граничных условий. Оригинальные решения и блестящие идеи, само собой, отходят на второй план. Лучше пойти по проторенной дороге и гарантированно получить результат без всяких неожиданностей.

«Прагматик» в человеке больше всего обеспокоен личными интересами и финансовым благополучием. Это под его тихое «нашёптывание» электронщик штампует безликие, но очень прибыльные проекты, думая о хлебе насущном и предстоящих покупках в магазине. Личные и семейные проблемы берут верх над мечтой о великом, а текучка съедает все мысли о необходимости дальнейшей учёбы и самосовершенствования. Домашние поделки «прагматик» мастерит не спеша, пытаясь найти любые оправдания задержкам. А если и делает, то с чьей-либо помощью, перекладывая часть забот на чужие плечи. Для изготовления, как правило, выбираются эффективные приборы с броским внешним видом, чтобы набрать баллы значимости в глазах у окружающих.

«Альтруист» скрыт в электронщике как «чёртик в табакерке». Никогда заранее не знаешь, что он задумал и когда проявит себя во всей красе. Примеры — неожиданный творческий порыв раздачи умных технических советов, генерация оригинальных схемных решений и дельных подсказок на форумах в Интернете, когда можно было бы и промолчать, написание бесплатных компьютерных программ, дарение радиодеталей малознакомым людям, безвозмездный ремонт радиоаппаратуры — да мало ли что ещё!

У каждого из четырёх перечисленных типажей характера есть плюсы и минусы. «Художник» заведует творческими способностями, но склонен к чрезмерному усердию и самовосхвалению. «Трудыга» воспитывает в человеке дисциплину и стимулирует достижение конечной цели, но он панически опасается перемен и изменения правил. «Прагматик» может далеко наперёд просчитать развитие ситуации, но делать работу любит за чужой счёт. «Альтруистом» быть хорошо, но постоянно им быть весьма накладно.

Возвращаясь от лирического отступления к трудовым будням, можно сказать, что настоящая книга предназначена для всех электронщиков безотносительно того, какой характер в них преобладает. Если внимательно присмотреться, то и в данной книге можно найти аналогичные психологические моменты. Например, придумать классификацию и рассортировать по порядку микроконтроллерные схемы — это творчество; собрать информацию из разных журналов, книг, Интернета — это большой труд; выбрать из массы технических решений только практически значимые — это прагматизм; решиться написать третью книгу после «хождения по мукам» с двумя первыми — это альтруизм по отношению к читателям.

В 2010 и 2011 г. в издательстве «Додэка-XXI» были выпущены две авторские книги «1000 и одна микроконтроллерная схема. Вып. 1» и «1000 и одна микроконтроллерная схема. Вып. 2» (далее — «Выпуск 1» и «Выпуск 2»). В них представлены сведения об архитектуре микроконтроллеров (МК), дана классификация микроконтроллерных семейств, сделан подробный анализ так называемого «идеализированного» МК на структурном, функциональном и логическом уровнях. В отдельных главах проанализированы типовые схемы узлов различных подсистем: ввода/вывода сигналов, питания, начального сброса, тактирования, программирования.

Настоящая книга является логическим продолжением первых двух выпусков. Стиль, подача материала, оформление первоисточников остаются прежними. К каждой схеме даются краткие пояснения. Иногда их больше, иногда их меньше, что зависит от объёма графики на странице. Главное, что схемы и пояснения физически находятся в одном и том же месте, перелистывать книгу не требуется.

Схемы надо изучать внимательно, «торопясь, не спеша». Краткость изложения приводит к тому, что осмысление логики работы устройства заставляет человека тренировать свой мозг и строить разные гипотезы о том, как же всё-таки эта схема работает. Процесс похож на разгадывание ребуса или участие в квесте. Ответы на возникающие вопросы могут находиться в пояснениях к другим схемам, имеющим аналогичное построение.

На основе существующих схем можно разрабатывать свои собственные. Недаром в любом деле ценятся специалисты, проявляющие креативность — т.е. умение создавать новое знание. А новое знание лучше всего создаётся на базе старого.

Все представленные в настоящей книге схемы рассортированы и разложены «по полочкам» согласно принятой ранее классификации. В книгу вошли новые подразделы, новые интерфейсы, новые перспективные направления, например Arduino. Это ответ на постоянное совершенствование архитектуры МК и увеличение функциональных возможностей микросхем.

Объём каждой из трёх книг не выходит за пределы 400 страниц. Это, думается, оптимальный вариант для компактного хранения на книжной полке каталога электрических схем, который всегда должен быть под рукой. Разумеется, существуют и электронные версии книг, предназначенные для чтения текста с экрана компьютера. Правда, опыт многих поколений показывает, что держать в руках бумажный фолиант намного приятнее и привычнее.

В теоретической части книги (глава 1) освещаются новые тенденции в классификации МК, уточняется их внутреннее устройство в свете появления недорогих моделей с разрядностью 32 бита. Приводятся условные графические обозначения, принятые в электрических схемах, содержащих идеализированный МК. Они в основном остались прежними, хотя добавились и новые.

В практической части книги (главы 2...10) представлен сборник схемных решений для подключения к МК входных, выходных, комбинированных узлов, а также интерфейсов, измерительных блоков, автономных приборов, устройств автоматики, конструкций с модулем Arduino. Многие электрические схемы взяты из интернациональной части Интернета, поэтому ссылки на их описания могут быть на английском, китайском, японском, немецком, нидерландском, греческом, турецком, итальянском и других языках.

В сумме с двумя первыми книгами получается справочник, состоящий почти из 3000 микроконтроллерных схем. Это уже вполне солидный капитал, с которым можно достаточно профессионально проектировать разнообразные устройства на основе 8-, 16- и 32-битных МК.

В программной части книги (глава 11) содержится обзор бесплатных систем компьютерного моделирования электронных схем. Для повседневной работы предлагается «студенческая» версия программы Micro-Cap фирмы Spectrum Software, переведенная на русский язык. Она достаточно популярна среди радиолюбителей, благодаря неограниченному сроку действия и простоте инсталляции.

Большим подспорьем при изучении Micro-Cap служат примеры схем, размещённые в Интернете, а также добротная учебная литература, издаваемая на русском языке. Моделирование позволяет без паяльника выяснить, будет ли работать схема, а если будет, то с какими параметрами и характеристиками.

В отношении МК — моделирование проводится на уровне подключения внешних контактов. Это позволяет использовать в качестве объектов моделирования практически все электрические схемы, приведенные в данной книге. Реальные радиоэлементы легко заменяются их виртуальными аналогами: резисторами, конденсаторами, транзисторами, диодами, переключателями, электронными ключами. Входные сигналы имитируются многофункциональными виртуальными генераторами. Источники питания — батареями. При этом ошибки в электрических соединениях не приведут к фатальным последствиям, ведь воображаемые радиодетали не горят и не плавятся.

В справочной части книги (приложения 1, 2) приводится вспомогательная информация, дополняющая общую картину. Отдельный компакт-диск к книге не прилагается. В эпоху широкого распространения Интернета нет смысла дублировать ту информацию, которую можно свободно скачать в Сети.

Ссылки на литературу и интернет-источники даются отдельно для каждой главы книги. Это хорошее подспорье тем, кто планирует дальнейшее самообразование. Библиография получилась с преобладанием английского языка, который в последнее время становится «лингва франка» в микроконтроллерном деле. Это объективная реальность, и к ней надо приспосабливаться.

Некоторые схемы, приведенные в настоящей книге, были специально изменены (по сравнению с оригиналом), чтобы учесть особенности идеализированного МК. Привнесённые «улучшизмы» никак не умаляют заслуг авторов этих схем. Они являются первопроходцами, и им выражается глубокая благодарность и признательность.

Порядок изучения материала в книге непринципиальный, но главе 1 всё-таки надо отдать предпочтение, чтобы освежить в памяти условные графические обозначения и разобраться в нововведениях внутреннего устройства МК.

Электрические схемы из глав 2...9 можно просматривать в любом порядке, в зависимости от поставленной цели. Как и прежде, рекомендуется освоить метод беглого пролистывания большого количества схем.

Во многих случаях важно не само техническое решение, а понимание того, насколько сложно оно реализуется на практике и с какими трудностями придётся столкнуться при составлении программы. Здесь как раз и поможет краткий сборник схем, подсказывающий пути решения проблемы, которые уже кем-то и когда-то были пройдены.

В настоящем издании использованы идеи, принципы и концепции, опубликованные в открытой литературе, печатных журналах, в Интернете. Это не противоречит части 4 статьи 6 Закона Российской Федерации «Об авторском праве и смежных правах»: «Авторское право не распространяется на идеи, методы, процессы, системы, способы, концепции, принципы, открытия, факты».

Автор книги и издательство предоставляют материалы, программы и схемы на условиях «как есть» («as is»), без каких-либо гарантий отсутствия ошибок и соответствия требованиям промышленных и государственных стандартов. Автор книги и издательство не несут юридической ответственности за прямые или косвенные, преднамеренные или случайные повреждения, возникшие в результате использования схем и прочей информации из данной книги.

## ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ МК

*Кто знает аз да буки, тому и книга в руки  
(Русская пословица)*

### 1.1. Загадки терминологии

За последнее время в техническом мире появилось много названий, в которых содержатся в разной комбинации слова: «микро», «мини», «нано», «контроллер», «компьютер», «процессор». Термины звучат похоже, но по физической сути они заметно различаются.

*Микропроцессор* (рус. МП, англ. MPU, Micro Processing Unit) — дословно означает «компактное процессорное устройство» или «процессор на одном кристалле». Относится к устаревшим ныне типам микросхем: Intel-8080, KP580BM80A, Z-80 и т.д. МП содержит вычислительное ядро, но без ОЗУ, ПЗУ и периферийных схем.

Считается, что слово «microprocessor» было введено в обиход фирмой Viatron Computer Systems, анонсировавшей в 1968 году одноимённую малую компьютерную систему. Сейчас на смену микропроцессорам пришли быстродействующие чипсеты, применяемые в материнских платах компьютеров. По функциональному назначению они являются центральными управляющими процессорами. Приставка «микро» к ним явно не годится.

*Микрокомпьютер* (microCPU, micro Central Processing Unit) — общий термин, который в разное время обозначал разные вещи:

- 1956 год — микрокомпьютер впервые упоминается в фантастическом рассказе Айзека Азимова «The Dying Night» как портативное вычислительное устройство далёкого будущего;
- 1960...1970-е годы — появились небольшие вычислительные комплексы для научных экспериментов, которые по сравнению с громоздкими ламповыми ЭВМ, занимавшими целые комнаты в здании, напоминали микроминиатюрный компьютер;
- 1970-е годы — были разработаны инженерные калькуляторы фирмы Hewlett-Packard. Для широкой публики они рекламировались как настольные вычислительные машинки «а-ля микрокомпьютер»;
- 1970...1980-е годы — микрокомпьютерами стали называть 8-битные компьютеры индивидуального пользования «Apple-II», «Commodore-64», «ZX-Spectrum» за их малые габариты и впечатляющие игровые возможности;

- 1980-е годы — появилась линейка процессоров фирмы Hitachi «SuperH microcomputer SH7000 series». Слово «microcomputer» применительно к обозначению одной микросхемы — это явное преувеличение. Но маркетологам можно поставить большой «плюс» за оригинальный рекламный ход, призванный подчеркнуть достоинство новой продукции;
- 1990-е годы — радиолюбители стран СНГ освоили массовое производство домашних микрокомпьютеров: «Специалист», «Радио-86ПК», «Орион-128», самодельных клонов «ZX-Spectrum»;
- 1990...2000-е годы — нарицательное название «микрокомпьютер» стали использовать для любых встраиваемых систем управления в бытовую и автомобильную технику. Например, микроволновая печь с микрокомпьютером, автомобиль с встроенным микрокомпьютером или спортивный тренажёр, управляемый от микрокомпьютера;
- 2010-е годы — новая «реинкарнация» старого термина. Теперь к микрокомпьютерам относят небольшие (с ладонь человека) одноплатные системы типа Raspberry Pi или CubieBoard. Они обладают низким энергопотреблением, мощным МК и собственной операционной системой. По производительности эти устройства близки к планшетам, но обеспечивают прямой доступ к портам GPIO и поддерживают разнообразную периферию. Вместо монитора используется видеовыход HDMI или матрица светодиодов, как в «школьном» микрокомпьютере «Micro:bit» фирмы BBC.

*Нанокomпьютер (nanoCPU).* В 2015 году российская фирма «Умная электроника» анонсировала сверхкомпактный сетевой встраиваемый «нанокomпьютер» Black Swift, ориентированный на разработки для «умного дома» и Интернета вещей.

Black Swift выполнен в виде печатной платы с габаритами 25x35x4 мм, что сопоставимо с размерами SD-карты. Схема и программное обеспечение являются открытыми. Операционная система Linux.

Black Swift содержит чипсет Qualcomm Atheros AR933 с 32-битным процессором на ядре MIPS 24K, работающим на частоте 400 МГц. Объём ОЗУ составляет 64 Мбайт, объём флеш-памяти — 16 Мбайт. Модуль поддерживает интерфейсы: USB 2.0, Ethernet, Wi-Fi 802.11b/g/n.

Нанокomпьютер способен функционировать сразу после подачи на него питания, можно от разъёма USB или от одного литиевого аккумулятора, которого, по данным разработчиков, должно хватить на 24 часа непрерывной работы при включённом Wi-Fi.

*Мини-компьютер (mini-PC, mini Personal Computer, компьютер-флешка)* — это новое, бурно развивающееся направление, поддерживаемое ведущими производителями электроники. Речь идёт о малогабаритных изделиях, напоминающих USB-флешку, внутри которых размещаются: основная и графический процессоры, ОЗУ, память с записанной операционной системой, модуль Wi-Fi. На корпусе устройства находятся несколько разъёмов, в том числе USB, microSD, HDMI, к которым могут подключаться: клавиатура, мышь, принтер, внешняя память, монитор, цветной телевизор.

Основные возможности мини-компьютеров можно проследить на примере HDMI-донгла Intel Compute Stick [1-1]. Внутри небольшого девайса размещается четырёхъядерный процессор Intel Atom, а также 2 ГБ оперативной и 32 ГБ постоянной памяти. Предустановлена ОС Windows 8.1, но может выпускаться с ОС Linux Ubuntu, что на треть дешевле. «Compute Stick» предназначен для подключения к мониторам и телевизорам, которые имеют разъём HDMI. В устройстве предусмотрен слот microSD, модули беспроводной связи Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.0 и стандартные порты USB, microUSB.

*Программируемый логический микроконтроллер* (рус. ПЛМ, англ. PLM, Programmable Logic Microcontroller) — это небольшой, конструктивно законченный блок промышленной автоматики, в котором содержатся: процессор (МК), источник питания, схемы сопряжения, разъёмы ввода/вывода, реле, кнопки управления, дисплей. Конструктивно устройство устанавливается на DIN-рейку промышленного стандарта. Выпускают фирмы Siemens, Schneider Electric, Unitronics. Иногда такие изделия называют «интеллектуальное реле».

По классификации ПЛМ относятся к общей группе программируемых логических контроллеров (ПЛК). Название «микро» для них вводится потому, что конструктивно различают ещё малые, средние и большие ПЛК.

*Микроконтроллер* (рус. МК, англ.  $\mu$ C, MCU, Micro Controller Unit) — в стандартном понимании это программируемая СБИС, предназначенная для управления внешними электронными устройствами в режиме реального времени. На одном кристалле МК размещаются: процессорное ядро, оперативная и долговременная память, регистры управления, программируемые порты ввода-вывода, аналоговые и цифровые интерфейсы. Компактность, многофункциональность, простота программирования и низкая стоимость — вот главные достоинства МК, способствующие их широкому применению в самых разных отраслях техники.

*Прикладной процессор* (Application Processor, процессор применений) — этот термин постепенно завоёвывает свою нишу, всё дальше отделяясь от стандартных МК. Относится он к тем современным чипам, которые имеют все признаки МК, но встроенное ОЗУ в них заменяется внешней шиной данных для подключения высокоскоростной памяти большого объёма.

Слово «микро» к таким чипам на язык не идёт, поскольку они имеют большой VGA-корпус с числом шариковых выводов от 100 и более. Функционально они также не «микро», поскольку обеспечивают поддержку очень сложных и быстродействующих интерфейсов, таких как Gigabit Ethernet и графика высокого разрешения.

Водораздел между обычными МК и прикладными процессорами можно условно провести по линейке микросхем с ядром ARM — к стандартным МК относятся 32-битные модели Cortex-M0...M4 и менее мощные, а к прикладным процессорам относятся модели Cortex-A5...A15 и более мощные.

Пограничным мостом между этими двумя классами может служить новое семейство МК Cortex-M7, планируемое к выпуску в 2015 году фирмами Atmel, Freescale Semiconductor, STMicroelectronics. Семейство обладает удвоенной производительностью по сравнению с более низкими по классу МК, но в нём отсут-

стует полная линейка интеллектуальных интерфейсов (по сравнению с прикладными процессорами).

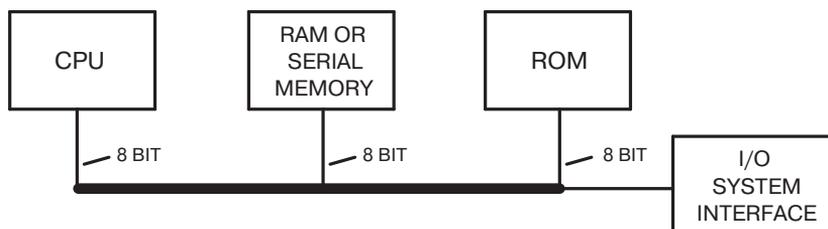
В целом прикладные процессоры примерно в 5...10 раз производительнее, чем МК. Они имеют в 100...1000 раз выше объём памяти. С другой стороны, энергопотребление и цена МК в разы ниже, а память у них находится внутри корпуса микросхемы, что способствует микроминиатюризации аппаратуры по габаритам.

Вывод — МК и прикладные процессоры имеют одни и те же корни, но разные сферы применения. Каждый из них хорош в своём деле, поэтому они мирно уживаются на рынке. Правда, для радиолюбительского творчества на первый план выходит цена, а также доступность покупки и простота освоения. Стандартные МК начального уровня по этим критериям пока вне конкуренции.

## 1.2. Историческая справка

МК и микропроцессоры исторически шли рука об руку и разрабатывались примерно в одно и то же время. Первым был запущен в производство знаменитый 4-битовый микропроцессор Intel 4004. Техническое задание на его разработку было выдано в апреле 1970 года, первые образцы были поставлены в Японию в марте 1971 года, а уже через полгода стартовали массовые продажи по всему миру.

Но мало кто помнит, что в том же 1971 году, 31 августа, сотрудником фирмы Texas Instruments Гарри Буном (Gary W. Boone) была подана патентная заявка, в которой он в явном виде описывал устройство МК. И хотя патент назывался «Computing Systems CPU» и слово «микроконтроллер» в нём ещё не прозвучало, но структурная схема содержала все составляющие микропроцессорной системы на одном кристалле с встроенной памятью и портами ввода/вывода (**Рис. 1.1**).



**Рис. 1.1.** Структурная схема прообраза МК

Заявка рассматривалась 2 года, после чего автор получил официальный патент U.S. 3,757,306 от 4 сентября 1973 года.

Говорят, что изобретения и открытия происходят из-за необходимости. Так случилось и с МК. В начале 1970-х годов на фирме Texas Instruments разрабатывали наборы микросхем для настольных калькуляторов фирм Canon и Olivetti. В конструкции получалось от 4 до 6 отдельных чипов. Возникла идея — удешевить продукцию путём сокращения числа микросхем, дополнив микропроцессорное ядро памятью программ и данных.

Так появились однокристалльные «калькуляторы-на-чипе» (Calculator-on-a-chip) TMS1802, TMS0100 в компактном корпусе DIP-28. Логические ячейки этих микросхем на заводе-изготовителе могли программироваться под разные задачи.

Правда, воспользоваться революционным изобретением фирме Texas Instruments в полной мере так и не удалось, поскольку технологии того времени ещё не позволяли совмещать цифровые и аналоговые тракты, да и коммерческая проницательность руководителей явно подвела.

Рынок вычислительных устройств в секторе промышленных изделий прочно заняли микропроцессоры фирмы Intel, а продукция Texas Instruments сосредоточилась в области потребительской электроники. Дешёвый чип TMS1000, разработанный в 1974 году, долгое время использовался в калькуляторах, музыкальных автоматах, электронных играх, бытовой технике, системах охранной сигнализации — но не более того.

В 1976 году фирмы Intel и Mostek пошли дальше, чем Texas Instruments, и разработали МК с новой 8-битной архитектурой для более требовательных к производительности приложений. Главными потребителями новых МК стали автомобильные концерны и заводы по изготовлению периферийных устройств (принтеры, факсы, кассовые аппараты). Семейство микросхем Intel MCS-48 было выпущено в версии с EPROM (модель 8748) и с масочным ПЗУ (модель 8048). Шаг был сделан в правильном направлении, что подтвердили успешные продажи.

В 1980 году появилось следующее поколение МК с усовершенствованной архитектурой MCS-51. Надо отдать должное фирме Intel, которая юридически не препятствовала клонированию новой архитектуры сторонними изготовителями. Совместимые с MCS-51 микросхемы стали выпускаться на 20 крупных фирмах, таких как Atmel, Dallas Semiconductor, Winbond, Silicon Laboratories, Texas Instruments, Cypress Semiconductor.

Благодаря унификации системы команд и стандартизации интерфейсов именно с архитектуры MCS-51 началось широкое внедрение МК в системы промышленной автоматики, любительские разработки и бытовые изделия.

В 1980...1990-х годах разработчики МК, не сговариваясь, стали дружно изобретать новые системы команд и новые архитектуры процессорных ядер, отличные от MCS-51. Так появились не совместимые между собой AVR- и PIC-контроллеры, а также МК других платформ, курируемые на фирмах: Texas Instruments, Motorola, Fujitsu, Infineon Technologies, Mitsubishi, NEC, NXP Semiconductors.

Чуть позже стало ясно, что выигрыш в производительности МК, если рассматривать каждую разработанную архитектуру в отдельности, не велик и не оправдывает больших финансовых, трудовых и интеллектуальных затрат.

Витавшую в воздухе идею унификации подхватила британская фирма ARM (ранее Acorn Computers). Она первой догадалась разрабатывать не МК в целом, а процессорные ядра к ним.

Название новому семейству ядер было дано по названию самой фирмы — ARM. Далее ядра и сопутствующие программные средства продавались разным изготовителям с отчислением роялти, т.е. процента от продажи. Процент устанавливался очень скромным, поэтому ядра раскупались как «блины на Масленицу».

Выгода для разработчика ядер налицо, ведь общее число лицензированных МК исчисляется миллиардами. Выгода для изготовителей — снижение затрат на разработку, продвижение и рекламу продукции.

Аббревиатура ARM (Advanced RISC Machine) прочно ассоциируется с МК разрядностью 32 бита. Первым было разработано ядро ARM1 (1985 год), затем появились семейства ядер ARM2...11 и, наконец, самое совершенное из них, Cortex.

Слово «Cortex» (рус. «кортекс») латинского происхождения. Обозначает оно «кору». В стандартном переводе имеется в виду кора обычного дерева, но в медицине — это кора головного мозга, что довольно близко по смыслу к вычислительным процессам и программированию.

В Табл. 1.1 приведена действующая классификация версий ARM. Математически строгой систематизации почему-то не получилось, поэтому надо отличать архитектуру ARMv7 от семейства ARM7. Кроме того, не надо удивляться, что ядро Cortex-M0 входит в одну, а Cortex-M3 — в другую версию архитектуры.

**Таблица 1.1. Классификация версий ARM**

Версия архитектуры	Процессорные семейства (ядра), разработанные на фирме ARM
ARMv1	ARM1
ARMv2	ARM2, ARM3
ARMv3	ARM6, ARM7
ARMv4	ARM7TDMI, ARM8, ARM9TDMI
ARMv5	ARM7EJ, ARM9E, ARM10E
ARMv6	ARM11, Cortex-M0, Cortex-M1
ARMv7	Cortex-A5...A17, Cortex-R4...R7, Cortex-M3...M7
ARMv8	Cortex-A53, Cortex-A57, Cortex-A72

Начиная с версии ARMv7, ядра разделяются на профили (Табл. 1.2, Табл. 1.3):

- «А» (Application) — высокопроизводительные 32- и 64-битные процессоры для встроенных систем, они же процессоры применений;
- «М» (Microcontroller) — микроконтроллерные системы общего (разного) назначения;
- «R» (Real time) — быстродействующие контроллеры реального времени.

**Таблица 1.2. Расшифровка профилей ARM, версия «А»**

Ядро	Год	Область применения, комментарии
Cortex-A5	2009	Замена ARM9, ARM11, высокая производительность
Cortex-A7	2011	Смартфоны, улучшенная версия Cortex-A8
Cortex-A8	2005	Применяется в Apple iPhone-3, Apple iPad
Cortex-A9	2007	Применяется в Apple iPhone-4, Apple iPad-2
Cortex-A12	2013	Многоядерные МК, быстрее, чем Cortex-A9
Cortex-A15	2010	Многоядерные МК, быстрее, чем Cortex-A9
Cortex-A17	2014	Новое название Cortex-A12
Cortex-A53/A57	2012	64-битные процессоры применений
Cortex-A72	2015	64-битные процессоры применений

Таблица 1.3. Расшифровка профилей ARM, версии «M», «R»

Ядро	Год	Область применения, комментарии
Cortex-M0	2009	Облегчённая версия Cortex-M3
Cortex-M1	2007	Матричное ядро для ПЛИС фирм Actel, Altera, Xilinx
Cortex-M3	2004	Версия для МК общего применения
Cortex-M4	2010	Улучшенная-версия Cortex-M3 с инструкциями DSP
Cortex-M7	2014	Улучшенная версия Cortex-M4 (32/64 бита)
Cortex-R4/R5/R7	2011	Системы реального времени на транспорте

В 1998 году фирма Atmel выпустила первый в мире МК на базе процессора с архитектурой ARM — ARM7TDMI. Он был оснащён уникальным набором системной периферии, включая контроллеры прерываний, таймеры и устройства битовых атомарных операций.

Если рассматривать радиолюбительское творчество, то чаще всего используют МК с ядрами Cortex-M0, Cortex-M3, Cortex-M4, в перспективе — Cortex-M7.

Многие фирмы выпускают примерно одинаковые по параметрам 32-битные МК. В частности, среди них можно выделить популярные и недорогие микросхемы с ядром Cortex-M3:

- AT91SAM3U1...AT91SAM3U4 (фирма Atmel);
- EFM32G200F16...EFM32G890F128 (фирма Energy Micro);
- HT32F1251...HT32F1253 (фирма Holtek Semiconductor);
- LPC1111...LPC1769 (фирма NXP Semiconductors);
- NUC100...NUC140, M058...M0516 (фирма Nuvoton Technology);
- STM32F100...107, STM32L151...162 (фирма STMicroelectronics);
- Stellaris-100...9000 (фирма Texas Instruments);
- 1986BE91T (фирма «ПКК Миландр», Россия).

### 1.3. Обновлённая классификация МК

Время идёт вперёд, и классификация МК, согласно диалектике, должна претерпевать изменения. Думается, что общими усилиями, постепенно, шаг за шагом будет выстроена чёткая система. На сегодняшний день, с учётом замечаний [1-2], можно предложить следующую классификацию МК:

- по разрядности — 1; 4; 8; 16; 32 бита. Имеется в виду разрядность внутренней магистрали данных, соединяющей процессорное ядро с памятью. Разрядность адресного пространства и регистров может быть иной. Модели ниже 8 бит относятся к историческому прошлому или узкоспециализированному настоящему. Модели старше 32 бит относятся к прикладным процессорам;
- по архитектурным особенностям:
  - ♦ архитектура процессора — RISC или CISC;
  - ♦ организация памяти — гарвардская или принстонская (фон Неймана);
  - ♦ количество вычислительных ядер — 1; 2; 4; 8;

- по форме представления информации:
  - ◆ только с цифровыми входами/выходами (специализированные МК);
  - ◆ с цифровыми входами/выходами и аналоговыми входами (универсальные МК с АЦП, аналоговым компаратором, блоком ОУ);
  - ◆ с цифровыми входами/выходами и аналоговыми входами/выходами («продвинутые» МК с двухканальным ЦАП);
- по типу памяти программ:
  - ◆ с масочным ПЗУ (Mask ROM);
  - ◆ с однократно программируемым ПЗУ (OTP ROM);
  - ◆ с электрически перепрограммируемым ПЗУ (англ. Flash, NOR Flash, рус. ЭСППЗУ, флеш);
  - ◆ с электрически перепрограммируемым ОЗУ (FRAM);
- по функциональному назначению:
  - ◆ универсальные с типовым набором проводных интерфейсов;
  - ◆ специализированные с контроллерами двигателей, зарядных устройств, тачскринов, LCD;
  - ◆ беспроводные с встроенными радиомодулями Bluetooth, RFID, Wi-Fi;
- по фирменным платформам — Atmel, Microchip, Motorola, STMicroelectronics, Philips, Texas Instruments, Fujitsu, Samsung и др.;
- по напряжению питания:
  - ◆ низковольтные «батарейные» 0.7...2.2 В;
  - ◆ «трёхвольтовые» с напряжением 2.7...3.6 В;
  - ◆ «пятивольтовые» с напряжением 4.5...5.5 В;
  - ◆ широкодиапазонные с напряжением 1.8...5.5 В;
  - ◆ высоковольтные с напряжением более 5 В;
- по конструкции:
  - ◆ корпусные (в пластмассовом или металлокерамическом корпусе, с широким спектром формфакторов от малогабаритных SMD до крупногабаритных корпусов BGA с «шариковыми» выводами);
  - ◆ бескорпусные на гибкой плёнке (другое название — «гибкие МК»);
  - ◆ «система на кристалле» (объединение разных технологий в одном корпусе БИС).

Существуют и другие интересные параметры, которыми характеризуются МК, но они либо не очень значимые, либо их пока рано брать в расчёт.

Знаменательный факт — широко применявшееся ещё несколько лет назад разделение микросхем на обычные МК и DSP в настоящий момент теряет актуальность. Сейчас функциями цифровой обработки сигналов наделяются многие модели универсальных МК общего назначения. Соперничество МК и DSP постепенно завершается поглощением второго первым.