

СЕРИЯ
ПРОГРАММИРУЕМЫЕ СИСТЕМЫ



1000 и ОДНА микроконтроллерная СХЕМА

ВЫПУСК 3

РЮМИК С.М.

ОМК
ИЗДАТЕЛЬСТВО

УДК 621.316.544.1 + 004.312.46

ББК 31.264

P97

Рюмик, С. М.

P97 1000 и одна микроконтроллерная схема. Вып. 3 / С. М. Рюмик. — М. : ДМК-Пресс, 2016. — 356 с. : ил. — ISBN 978-5-97060-348-2.

Книга является третьей частью авторского издания под общим титульным названием «1000 и одна микроконтроллерная схема». Ранее в издательстве «Додэка-XXI» вышли в свет две книги из данной серии: «Выпуск 1» (2010 г.) и «Выпуск 2» (2011 г.). Новая книга «Выпуск 3» служит их логическим продолжением и дополнением. В ней содержатся электрические схемы сопряжения микроконтроллеров с внешними устройствами. Основной упор, в отличие от аналогичных по тематике изданий, делается на рассмотрение небольших, конструктивно завершённых, схемных узлов.

В книге освещается работа базовых микроконтроллерных подсистем, в частности ввода и вывода сигналов, питания, тактирования, сброса, программирования. Уделяется должное внимание популярным интерфейсам: USB, SPI, RS-485, I²C, 1-Wire. Приводятся схемы электрической «обвязки» для популярных плат Arduino, которые тоже содержат микроконтроллеры.

Книгу можно считать справочником типовых решений, поскольку все электрические схемы систематизированы по разделам и снабжены краткими пояснениями о назначении элементов. Ссылки на дополнительные материалы и литературу даны в конце каждого из разделов. В общей сумме в трёх книгах «Выпуск 1...3» насчитывается около 3000 схем.

В книге содержится мини-курс, посвящённый компьютерному моделированию. Приводится методика анализа небольших узлов, подключаемых к выводам микроконтроллеров. С помощью моделирования можно заранее спрогнозировать результат работы устройства без паяльника и без макетирования «в железе».

Книга будет полезна разработчикам электронной аппаратуры, радиолюбителям (в том числе начинающим), студентам, а также всем неспециалистам в области электроники, самостоятельно осваивающим микроконтроллеры.

УДК 621.316.544.1 + 004.312.46

ББК 31.264

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.

ISBN 978-5-97060-348-2

© Рюмик, С.М., 2016

© Оформление, Издание, ДМК Пресс, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	9
Глава 1. Из чего состоит МК	
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. Вакуумные 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
Глава 6. Типовые схемы комбинированных узлов ввода/вывода	
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
Глава 7. Типовые схемы интерфейсных узлов	
7.1. COM-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 ² 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
Глава 8. Типовые схемы автономных устройств	
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
Глава 9. Схемы для Arduino	
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
Глава 10. Схемы, не рекомендуемые к применению	
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
Глава 11. Среда моделирования Micro-Cap	
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 макро модель инвертора для МК	336
11.4.8. Экспериментальное уточнение параметров макро модели.	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
Послесловие.	347
Приложения	
Приложение 1. Ссылки и адреса в Интернете	349
Приложение 2. Список аббревиатур.	353

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-86РК», «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 25×35×4 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 24К, 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: основной 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. μ 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**).

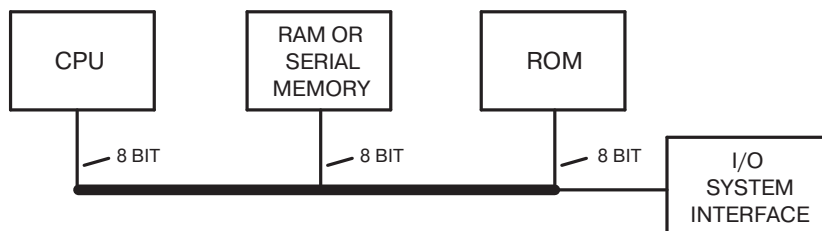


Рис. 1.1. Структурная схема прообраза МК

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 встроженных 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.

1.4. Микроконтроллерные новости

Если внимательно проанализировать изменения, появившиеся в обновлённой классификации МК, то можно заметить новинки, которые может ожидать большое будущее. К ним, в частности, относятся: мультиядерные МК, МК на гибкой основе, МК с памятью FRAM, беспроводные МК, а также значительно подешевевшие 32-битные модели начального уровня. Вчера такие изделия считались фантастикой, сегодня — верхом совершенства технологии, а завтра?

1.4.1. Мультиядерные МК

Идея создания компьютерных систем с несколькими процессорами (ядрами) не нова. Попытки предпринимались неоднократно, на всех этапах становления компьютерной техники. Из конструкций прежнего времени, что были на слуху, запомнились так называемые «транспьютеры» английской фирмы Inmos.

Транспьютер (англ. Transputer) — это базовая ячейка многопроцессорной системы, которая выполнена на одном кристалле. Термин происходит от слияния слов «транзистор» и «компьютер». Это, по мнению разработчиков, должно было подчёркивать возможность построения мощных компьютерных комплексов по аналогии с приёмом, заимствованным из схемотехники УМЗЧ, когда уровень звука увеличивается путём параллельного включения выходных транзисторов.

Первые образцы транспьютерных систем появились в 1987 г. Готовый к реальному применению 32-битный транспьютерный чип IMST414B был представлен в 1989 г. Но это направление опередило своё время и оказалось слишком экзотичным для массового потребителя.

Главным достижением транспьютеров можно считать апробацию новых механизмов сложных параллельных вычислений, что дало понимание разработчикам, куда двигаться дальше.

В нынешнее время несколькими ядрами в микросхемах никого не удивишь. В современных компьютерах, планшетах, мобильных телефонах широко применяются процессоры с количеством вычислительных ядер от 2 до 8. Но в мировом масштабе это капля в море, если сравнить, например, с китайским суперкомпьютером «Tianhe-2», имеющим 3 миллиона (!) ядер.

Для МК параллельная архитектура вычислений тоже годится для использования. Применяется она в следующих случаях.

- 1) Для распараллеливания вычислительных потоков. Пример — мультиядерные МК семейства xCORE фирмы XMOS, содержащие внутри от 4 до 16 симметричных логических ядер, а также коммутатор потоков и планировщик задач. Каждое ядро имеет свой набор регистров. Математические вычисления производятся в N раз (N ядер) быстрее. Коммутатор и планировщик на аппаратном уровне выполняют функции, присущие операционной системе реального времени.
- 2) Для шифрования информации в так называемых криптографических МК. Пример — МК AT97SC3204 фирмы Atmel, в котором помимо основного содержится отдельное ядро криптопроцессора, осуществляющее ускоренное шифрование внутренних данных в реальном времени.

- 3) Для размежевания выполняемых функций по сопроцессорному принципу. Пример — двухъядерные МК F28M35x фирмы Texas Instruments, в которых имеются основное ядро общего назначения ARM Cortex-M3 и ядро сопроцессора DSP. Первое из них служит для обработки прерываний, обмена данными и слежением за состоянием объекта. Второе ядро занимается чистой математикой, в частности расчётами сложных алгоритмов управления.
- 4) Для выполнения разноплановых задач во внутренней сетевой структуре. Пример — трёхъядерные МК 1892BM2...1892BM5 производства российской фирмы «ЭЛВИС». Все они построены по асимметричному принципу — одно большое центральное и несколько вспомогательных ядер, при этом центральное ядро руководит всеми действиями системы и распределяет сетевые потоки информации. Вспомогательные ядра могут использоваться в качестве видео- или графических акселераторов.

1.4.2. Гибкие МК

Мобильные телефоны и наручные часы, имеющие изогнутый экран, постепенно входят в наш быт. Логично предположить, что для изогнутого корпуса таких девайсов нужны гибкие печатные платы с нанесёнными на них эластичными радиоэлементами. Поскольку МК являются основой практически всех бытовых электронных устройств, то проблема изгиба корпуса становится актуальной уже сейчас.

Термин «гибкий МК» ввела в оборот фирма American Semiconductor, которая в 2013 году продемонстрировала семейство микросхем FleX-MCU [1-3]. Это первые в мире физически эластичные МК, произведённые по технологии 130 нм под названием Silicon-on-Polymer (кремний на полимере).

Собственно МК размещается на гибкой плёнке и имеет напылённые выводы для подключения периферии и питания.

Электрические параметры гибкого МК вполне адекватны его назначению и конструкции:

- тактовая частота 20 МГц, память программ 1 Кбайт, ОЗУ 8 Кбайт;
- 24 линии GPIO, 2 таймера-счётчика, UART, SPI, 3 канала ШИМ, JTAG;
- питание 1.2 В (ядро) и 2.5 В (линии ввода/вывода);
- 68 напылённых выводов 0.16×0.16 мм;
- общие габаритные размеры 5.1×5.1 мм;
- масса 0.45 мг.

1.4.3. МК с сегнетоэлектрической памятью FRAM

Первопроходцем освоения технологии FRAM считается фирма Ramtron International. Именно её микросхемы энергонезависимой памяти появились на рынке примерно 15 лет назад. По цоколёвке выводов и системе команд они были аналогичны популярному семейству EEPROM 24xx, но обеспечивали в разы большее быстродействие и практически неограниченный ресурс циклов перезаписи информации.

Идея заменить встроенную в МК Flash-память более совершенной FRAM-памятью упиралась в технологические ограничения. Первой сумела их обойти фирма Texas Instruments, которая в середине 2011 года начала производство МК семейства MSP430FR57xx, где область памяти программ была выполнена на энергонезависимой памяти с особыми свойствами.

FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) — это сегнетоэлектрическая память с произвольным доступом к ячейкам. Информация в ней хранится в микроминиатюрных конденсаторах, выполненных на основе сегнетоэлектрической керамики. Диэлектрическая константа сегнетоэлектрика значительно выше, чем у обычного диэлектрика, поэтому заряд не рассасывается очень долго во времени.

Скорость записи данных в ячейки FRAM сравнима с ОЗУ. Число циклов перезаписи не ограничивается во времени, т.к. составляет более 10^{15} раз.

Считается, что МК с FRAM выгодно применять в системах с так называемой «единой памятью». Объяснить, что это такое, можно на примере автономной системы сбора информации с удалённых датчиков, в которой данные должны храниться в МК до очередного сеанса связи. Если объём информации большой, то в дополнение к стандартному управляющему МК обычно ставят одну или несколько микросхем внешней памяти EEPROM.

Если заменить обычный МК его аналогом с FRAM-памятью, то можно сэкономить на микросхемах EEPROM. Идея заключается в том, что в общей памяти программ МК выделяется достаточно большое по объёму место для хранения оперативных данных с датчиков. Они записываются в FRAM на большой скорости и не теряются при пропадании питания. Следовательно, такая система имеет повышенное быстродействие и хорошие шансы на выживание в экстремальных условиях.

Концепция «единой памяти» реализована в МК семейства MSP430FR, где кроме всего прочего существует специальный программный модуль, который защищает область памяти программ от случайной перезаписи.

Иногда вместо термина FRAM используют термин FeRAM. Надо правильно понимать, что приставка «Fe» не относится к химическому элементу «феррум» (железо) из таблицы Менделеева под номером 26. Магнитные поля на микросхему с FRAM не действуют. В данном случае можно лишь акцентировать внимание на сходство петли гистерезиса сегнетоэлектрика с петлёй магнитного гистерезиса железа. В отличие от последнего, гистерезис FRAM обусловлен электрическими, а не магнитными, диполями.

Основными достоинствами МК с FRAM являются:

- низкое энергопотребление, примерно 100 мкА/МГц;
- высокая скорость записи (выигрыш, по сравнению с Flash, до 100 раз);
- отсутствие высокого напряжения при программировании;
- высокая надёжность хранения информации;
- устойчивость к воздействию ионизирующих излучений;
- произвольный доступ к любой отдельной ячейке памяти, как для чтения, так и для записи данных.

Недостаток МК с FRAM — высокая цена (хотелось бы надеяться, пока).

1.4.4. Беспроводные МК

Wireless MCU (беспроводные МК) — это новый и весьма перспективный класс изделий, симбиоз цифровых и радиочастотных технологий. Важно понимать, что речь идёт не о гибридном модуле, содержащем металлический корпус, внутри которого на общей печатной плате отдельно размещается МК и отдельно детали радиоканала, а именно об одной твёрдотельной микросхеме небольшого размера.

Радиочастотная приёмопередающая антенна в состав беспроводного МК не входит. Она подключается к нему через один или два вывода. В первом случае используется штыревая, а во втором — петлевая антенна.

Беспроводные МК в зависимости от диапазона частот и применяемых интерфейсов можно разделить на несколько функциональных групп. Их состав, классификацию и возможности предлагается проследить на примере линейки микросхем фирмы Texas Instruments.

- 1) Семейство RF430FR. Для связи используется коротковолновой радиоканал на частоте 13.56 МГц. Внутри микросхемы находится микромощный управляющий контроллер с ядром MSP430 и транспондер RFID (англ. **R**adio **F**requency **I**Dentification, радиочастотная идентификация). Питание на микросхему поступает через антенну индукционным способом вместе с информационными данными. Считывание производится на расстоянии до 20 см. Типовое применение — система электронных пропусков на территорию предприятия.
- 2) Семейство CC430. Для связи используются дециметровые волны в полосе частот УКВ 315...920 МГц. Связь осуществляется на скорости до 500 Кбод между двумя и более участниками сети. Могут использоваться различные протоколы передачи информации, как стандартные, так и нестандартные. Внутри одного чипа интегрирован МК общего назначения с ядром MSP430 и приёмопередатчик (радиотрансивер).
- 3) Семейство SimpleLink CC11xx, CC13xx. Для связи используется дециметровый радиоканал УКВ в полосе частот 315...920 МГц. Контроллер может иметь ядро MCS-51 или Cortex-M3. Передача цифровых данных производится со скоростью до 4 Мбит/с на расстояние до 250 м. В простейшем случае такую систему можно рассматривать как беспроводной удлинитель канала UART с сигналами *RxD*, *TxD*. Допускаются различные сетевые протоколы, в частности 6LoWPAN. Совмещение цифрового МК и аналогового радиотракта внутри одной микросхемы позволяет удешевить и миниатюризировать продукцию.
- 4) Семейство SimpleLink CC2540, CC2640, CC2650. Для связи используется радиоканал СВЧ на частоте 2.4 ГГц. Поддерживаются протоколы Bluetooth-4.0/4.1, что удобно при сопряжении с ноутбуком, планшетом, мобильным телефоном. Строго говоря, внутри такого чипа находится не один, а два МК. Первый из них, Cortex-M3 (или MCS-51), является основным, «градообразующим», а второй, Cortex-M0, входит в состав Bluetooth-ядра и отвечает за сетевой стек.
- 5) Семейство SimpleLink CC2430, CC2630. Для связи используется радиоканал СВЧ на частоте 2.4 ГГц. Контроллер с ядром Cortex-M3. Поддерживается протокол ZigBee IEEE 802.15.4. Аналогичные по функциям микросхемы изготавливаются и другими фирмами: JN5148 (Jennic), MC13213 (Freescale), EM250 (Ember), ZBS240 (Samsung), ATmega128RFA1 (Atmel).

6) Семейство SimpleLink CC32xx. Для связи используется радиоканал СВЧ на частоте 2.4 ГГц. Базовый контроллер с ядром Cortex-M4. Главная «фишка» — встроенный модуль Wi-Fi с выходом в Интернет, что позволяет приобщиться к перспективной технологии «Интернета вещей» (Internet of Things, IoT, Internet-on-a-chip). Под этим термином подразумевается совокупность электронных приборов и бытовой техники, которые обмениваются между собой информацией прямо через Интернет. Например, используя микросхемы беспроводных МК, можно осуществить мониторинг состояния температуры и влажности в квартире, удалённо управлять «умным домом», автоматизировать полив цветов, включать/отключать освещение, открывать/закрывать двери гаража и т.д.

Серьёзность данного направления подчёркивают сообщения средств массовой информации о том, что корейская фирма Samsung в 2017 году планирует завершить строительство нового завода по производству «беспроводных» микросхем стоимостью \$14,4 млрд. Производственная линия в г. Пхёнхэк возле Сеула будет крупнейшим за всю историю компании инвестиционным проектом, который создаст 150 тысяч рабочих мест, а стоимость выпускаемых микросхем для «Интернета вещей» составит \$37 млрд.

1.4.5. 32-битные МК начального уровня

Эра доминирования 8-битных МК в любительских конструкциях постепенно заканчивается. Всё чаще можно встретить разработки на базе недорогих МК с разрядностью 32 бита. Этому способствует парадоксальная ситуация, когда стоимость МК начального уровня мало зависит от его разрядности.

В нынешнее время переход в обучении от «8 бит» к «32 битам» происходит, как правило, без промежуточных «16 бит». В этом есть своя чёткая логика. Дело в том, что 32-битные МК разных фирм-изготовителей сплошь и рядом базируются на популярном ядре Cortex, а у 16-битных МК такой общей платформы нет. Следовательно, разработчику аппаратуры легче один раз изучить особенности архитектуры Cortex, чтобы в дальнейшем применять свои знания для других семейств МК, отличающихся в основном периферией. Кроме того, 32 бита — это всё-таки не 16, со всеми вытекающими последствиями в части повышенного быстродействия и разнообразия доступных интерфейсов.

Многие изготовители придерживаются именно такой точки зрения. Например, фирма STMicroelectronics выпускает по состоянию на 2016 год только две базовые линейки МК: 8-битные STM8 и 32-битные STM32. Модели с разрядностью 16 бит в портфеле заказов отсутствуют.

32-битные МК, базирующиеся на ядре Cortex, стали стандартом «де-факто» во всём мире. Сферы их применения — от GSM-модулей, измерительной техники и цифровых книг до контроллеров жёстких дисков и GPS-навигаторов.

Профессиональному эмбеддеру такая ситуация выгодна — не надо досконально переучиваться, если в разработке вдруг потребуется сменить тип МК. Названия регистров, система команд, функционирование подсистем будут очень похожими, поскольку идеология архитектуры одинаковая.

Разработчики микросхем, официально лицензировавшие ядро Cortex, получают «в подарок» унифицированную систему команд, переносимое программное

обеспечение и добротную RISC-архитектуру. Теперь конкуренция между разными фирмами-изготовителями переносится в сферу встроенной в МК периферии. Разработчики соревнуются друг с другом в удобстве программирования, экономичности, быстродействии, технологии изготовления, издержках производства.

Последнее обстоятельство, кстати, привело к тому, что уже сейчас 32-битные МК стали такими же по цене или даже дешевле, чем их 8-битные собратья при сопоставимых или лучших параметрах. «Лучших», в частности, по разрядности и частоте дискретизации внутренних АЦП и ЦАП, что без сомнения пригодится в самодельных музыкальных устройствах.

Рядовых пользователей также интересуют практические вопросы, связанные с доступностью программных средств для 32-битных МК. Здесь тоже всё в порядке. Поскольку изготовителей микросхем много, значит, и информационная поддержка на уровне. Компиляторы и системы отладки во многих случаях бесплатные. Адекватные программисты секретов друг от друга не делают, следовательно, можно самостоятельно найти нужную информацию в Интернете. При затруднениях помогут на форумах, где собираются целые сообщества энтузиастов. Массовость в освоении МК — это большое подспорье как для начинающих, так и для более опытных.

Последним решающим фактором, перевешивающим достоинства над недостатками, является наличие в свободной продаже недорогих стартовых плат, которые специально реализуются почти по демпинговым ценам («для затравки» потребителя). Они в разы облегчают освоение 32-битных МК. Каждый крупный изготовитель в этом вопросе постарался на славу. Например, фирма STMicroelectronics предлагает три десятка (!) разновидностей стартовых плат из семейств «Discovery» и «Nucleo» с различными МК от Cortex-M0 до Cortex-M4.

Подведение итогов. МК начального уровня с разрядностью 32 бита являются кандидатом номер один на применение в любительских разработках. С них, для тех, кто не боится, можно даже начинать обучение контроллерному ремеслу.

1.4.6. Клонирование МК

Речь пойдёт не о пиратских подделках, связанных с перемаркировкой текста на корпусе микросхемы, не о контрафактном послыном «вскрытии» внутренностей чипа и не о гаражной продаже отбракованных на заводе-изготовителе кристаллов МК. Под «клонированием» в данном случае понимается процесс легального выпуска микросхем, совместимых с оригиналом по цоколёвке выводов (pin-to-pin), по вычислительному ядру, по системе команд, по назначению битов внутренних регистров и даже по составу и функциональным возможностям поддерживаемой периферии.

За примером далеко ходить не надо. В апреле 2013 года появились первые сообщения о выпуске китайских клонов МК, аналогичных семейству STM32F103 фирмы STMicroelectronics. В названии клонированных микросхем, для удобства потребителей, лишь заменили первые две буквы. В результате в продажу стали поступать 32-битные МК GD32F103 от фирмы GigaDevice Semiconductor. По состоянию на 2015 год та же фирма выпускает целые линейки клонов STM32F1xx и STM32F2xx [1-4], причём их цена ниже оригинала.

К чести китайского изготовителя, следует отметить, что клонирование производилось не один к одному, а с улучшением целого ряда параметров. В частности, максимальная тактовая частота повышена с 72 до 108 МГц, объём Flash-памяти увеличен с 128...1024 КБ до 3 МБ, объём ОЗУ — с 20...128 до 96...256 КБ. Кроме того, при одинаковой тактовой частоте снижена потребляемая мощность на 20...30% и увеличена эффективность выполнения программного кода на 30...40%. Добавлены интерфейсы контроллера цветного дисплея TFT и контроллера внешней памяти SDRAM. Производитель уверяет в программной совместимости с STM32F и идентичности электрических параметров.

Фирма GigaDevice Semiconductor не новичок в области изготовления электронных компонентов. Это один из крупнейших в Китае и в мире поставщиков микросхем памяти SPI NOR Flash для мобильных телефонов и проигрывателей DVD. Фирма серьёзная, поэтому уделяет должное внимание авторским правам. В частности, для своих клонов МК вычислительное ядро Cortex-M3 было лицензировано у фирмы ARM. Встроенная в клоны МК Flash-память официально запатентована и имеет оригинальную технологию под названием «gFlash». Фирма STMicroelectronics лишь наблюдает за процессом, пока не предъявляя претензий.

Из «минусовых» отличий линейки GD32F по сравнению с оригиналом — более узкий диапазон питания 2.6...3.6 В против 1.65...3.6 В у STM32F, а также более узкий температурный диапазон: $-40...+85^{\circ}\text{C}$ против $-40...+125^{\circ}\text{C}$ у STM32F.

Потребительская ориентация 32-битных клонов МК направлена в основном на внутренний рынок Китая. Возможная причина — импортозамещение.

В целом клонирование 32-битных МК начального уровня можно рассматривать как процесс, аналогичный массовому изготовлению 10...20 лет назад клонов МК с ядром MCS-51/52. И тогда тоже «впереди планеты всей» были китайские изготовители. Кстати, это помогло им с минимальными издержками освоить промышленный выпуск огромного количества телевизоров, в которых использовались специализированные микросхемы с встроенным ядром MCS-51/52 (масочная технология) и внешней памятью программ. Такой симбиоз двух микросхем оказался гораздо дешевле, чем применять отдельный МК с Flash-памятью.

1.5. Мотивация в изучении МК

Любой электронщик, освоивший хотя бы один тип МК, может поставить в своём списке жизненных достижений большой знак «плюс». Как правило, начинают с простых 8-битных AVR- и PIC-контроллеров фирм Atmel и Microchip Technology. А что же дальше? Какое семейство или ядро выбрать, на чем остановиться?

Мотивация следующая:

- хочу изучить новую архитектуру МК, это престижно;
- хочу быть в курсе новинок техники, чтобы не отставать от жизни;
- хочу улучшить параметры своего ранее сконструированного прибора путём установки в него нового МК;
- хочу (так же, как и сосед) сделать полезное домашнее устройство на новой элементной базе.

Малогабаритные 8-битные МК вне конкуренции были и остаются применительно к простейшим конструкциям. Более мощные 32-битные МК позиционируются как кирпичики для построения многоканальных датчиковых и исполнительных устройств, «мозговых» центров управления, систем обработки аудио- и видеоданных. К быстродействующим 32-битным МК подключают: интеллектуальные датчики, дисплеи, радиомодули. На их основе разрабатываются роботы.

Какое семейство МК выбрать для освоения — каждый решает самостоятельно. Но если выбор сделан, то нужно каждый день хотя бы немного приближаться к цели, изучая документацию, схемы, составляя программы. Важно поверить в свою мечту и избегать негативного общения с теми людьми, которые в неё категорически не верят.

Изучение 32-битных МК может стать хорошим мотиватором для сомневающихся, чтобы совершить прыжок в будущее. Сделать это вполне реально при условии решения двух бытовых проблем:

- обеспечить постоянный доступ в Интернет в домашних условиях;
- научиться запаивать микросхемы с очень малым расстоянием между выводами или научиться обходить эту проблему.

Подключение к Интернету в нынешнее время для радиолюбителей становится такой же необходимостью, как наличие персонального компьютера, цифрового мультиметра и паяльника с тонким жалом. Если Интернета нет, то положительных результатов ждать сложно.

В идеале у каждого землянина в будущем будет безлимитное подключение к Всемирной паутине 24 часа в сутки 7 дней в неделю, причём за небольшие деньги или вообще бесплатно. Для самостоятельного освоения МК достаточно иметь хотя бы периодический доступ к Интернету, например на работе, в учебном заведении, в библиотеке, в интернет-кафе, в клубе, у знакомых. На первый случай подойдёт даже зона бесплатного общественного Wi-Fi в парках или на транспорте.

К Интернету можно подключиться следующими способами:

- через HCNA-модем, соединённый с сетью кабельного телевидения;
- через ADSL-модем, подключённый к телефонной линии;
- через компьютерную проводную Ethernet-сеть местного провайдера;
- через Wi-Fi-роутер, обслуживающий компьютеры на расстоянии 50...100 м;
- через малогабаритный 3G-модем, вставляемый в разъём USB компьютера.

Каждый из перечисленных способов имеет свои преимущества. Например, совмещение Интернета и кабельного телевидения не требует прокладки дополнительных проводов по квартире. В компьютерной сети местного провайдера обычно самые низкие тарифы. Беспроводной Wi-Fi удобен при наличии в доме нескольких компьютеров и планшетов. 3G-модем с ноутбуком можно взять с собой в поездку или использовать, как основной, в сельской местности.

Технология монтажа микросхем не вызывает проблем, если речь идёт о 8-битных МК в DIP-корпусе с расстоянием между выводами 2.54 мм. Но современные 32-битные контроллеры отличаются сверхминиатюрностью. И причина здесь кроется в физике, поскольку для высоких частот требуется уменьшение паразитной индуктивности выводов. Лучшее, что смогли инженеры придумать, — это

миниатюризировать контакты микросхем. Так появились четырёхгранные TQFP-корпуса с расстоянием между выводами 0.5...1 мм.

К сожалению, при монтаже подобных чипов без специальных паяльных станций, твёрдой руки и орлиного зрения не обойтись. Более того, нужно научиться делать печатные платы с очень тонкими дорожками, а освоить лазерно-угюжную технологию не каждому по плечу.

В качестве компромиссного решения многие радиолюбители используют покупные платы-переходники. На них уже вытравлены дорожки под четырёхгранный TQFP-корпус МК. Проводники от всех выводов корпуса поступают к металлизированным отверстиям на краях платы. Их расположение может быть в 2 или 4 ряда. Главное, что расстояние между выводами увеличивается до 2.54 мм, что удобно для пайки и не напрягает зрения.

Называются такие изделия «Платы-переходники TQFP/DIP». Если в отверстия по краям запаять гребенчатые соединители типа PLS (это ответные части джамперов на платах), то полученный сборный модуль можно устанавливать в разьёмы или многократно запаивать в рабочие платы как обычные микросхемы МК.

Кардинально решить проблему монтажа 32-битных МК позволяют отладочные платы, подобные «Discovergy» или «Nucleo». На них уже запаян «многоножечный» МК и его кварцево-резисторно-конденсаторная «обвязка». Это гарантирует отсутствие ошибок в монтаже и сводит к минимуму человеческий фактор. Программируется МК встроенным в плату программатором, так что и эта проблема автоматически отпадает.

Отладочные платы имеют стандартные разьёмы с расстоянием между выводами 2.54 мм и могут быть встроены в разрабатываемый прибор, как обычные микросхемы. Более того, если применить беспаячные монтажные платы, тогда вообще при изготовлении устройства с МК можно обойтись без паяльника.

1.6. Какой МК выбрать?

Популярность того или иного семейства МК определяется многими факторами. От разнообразия моделей легко растеряться, тем более что каждая фирма усиленно хвалит свой товар. Но существуют и объективные данные, основанные на математическом аппарате статистики. Одним из косвенных признаков популярности электронных компонентов является динамика посещаемости специализированных сайтов в Интернете.

Например, в рамках интернет-ресурса «eFind.ru» сходятся интересы разных групп пользователей: поставщиков электронных компонентов, производителей приборов, разработчиков электронной продукции, инженеров по применению. Сервисом пользуются несколько тысяч человек в день, делая около 20 000 поисковых запросов. Это позволяет набрать большой объём статистики об интересах и стандартных предпочтениях.

Поскольку МК является таким же электронным компонентом, как и любая другая микросхема, то можно проводить анализ по фирмам-изготовителям, по годам выпуска, по семействам, архитектуре и т.д.