

УДК 621.316.544.1 + 004.312.46

ББК 31.264

Р97

Рюмик С. М.

Р97 Прикладные процессоры: введение в схемотехнику / С. М. Рюмик. — М.: ДМК-Пресс, 2024. — 342 с.: ил. — ISBN 978-5-93700-264-8.

В книге рассматриваются прикладные процессоры, которые являются базой для построения одноплатных компьютеров. Практическое умение работать с ними входит в обязательный инструментарий современных разработчиков электронной аппаратуры.

В одноплатных компьютерах присутствуют все элементы стандартных микроконтроллерных систем, а именно подсистемы питания, тактирования, сброса, программирования, ввода и вывода сигналов, интерфейсов. Каждая подсистема имеет свои особенности и отличия, что представляет интерес для анализа и сравнения.

Электрические схемы в настоящей книге представлены фрагментарно, в виде небольших узлов. Их систематизация проводится сначала на уровне подсистем, а затем на уровне функциональных возможностей. Все схемы снабжаются краткими пояснениями о назначении элементов и особенностях их эксплуатации. Где известно, там приводятся встречающиеся на практике замены. Сами схемы одноплатных компьютеров секрета не представляют, поскольку свободно доступны в Интернете на официальных сайтах фирм-изготовителей.

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

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 978-5-93700-264-8

© Рюмик, С.М., 2022

© Оформление, Издание, ДМК Пресс, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	8
Глава 1. Одноплатные компьютеры	
1.1. Зачем это нужно?	12
1.2. Микрокомпьютеры	13
1.3. Области применения SBC	14
1.4. Разновидности SBC	15
1.5. Отличия между SBC и отладочными платами с МК	15
1.6. Подробный анализ AP	17
1.6.1. Терминология	17
1.6.2. Историческая справка	18
1.6.3. Первичная классификация AP	18
1.6.4. Водораздел между МК и AP	19
1.6.5. Обобщённая структурная схема AP	20
1.6.6. Внутренние и внешние интерфейсы	21
1.6.7. Примеры реальных AP	22
1.6.8. Структурная схема OMAP4430.	23
1.6.9. Структурная схема RK3566.	34
1.6.10. Структурная схема APQ8016	44
1.6.11. Структурная схема i.MX 8QuadMax	51
1.6.12. Нюансы, выявленные при изучении даташитов AP	62
1.7. Подробный анализ SBC	63
1.7.1. Внутреннее устройство SBC	63
1.7.2. Структурная схема Rico Board	65
1.7.3. Структурная схема Bubblegum96	68
1.7.4. Структурная схема Orange Pi 3.	72
1.7.5. Структурная схема Wanboard i.MX6 Quad	75
1.7.6. Нюансы, выявленные при изучении документации SBC	78
1.8. Условные обозначения на схемах с AP	79
Список использованных источников и литературы к главе 1	85

Глава 2. Схемы узлов ввода сигналов

2.1. Механические датчики	87
2.1.1. Тактовые кнопки.	87
2.1.2. Джемперы.	89
2.2. Акустические датчики.	90
2.2.1. Аналоговые микрофоны	90
2.2.2. Цифровые микрофоны	92
2.2.3. Приём линейных звуковых сигналов	93
2.3. Фотодатчики и ИК-приёмники	95
2.4. Датчики пространственного положения	97
2.5. Приём аналоговых видеосигналов	98
2.6. Прочие схемы узлов ввода	100
Список использованных источников и литературы к главе 2	101

Глава 3. Схемы узлов управления и тактирования

3.1. Формирование сигналов начального сброса	102
3.1.1. Автоматический сброс AP	102
3.1.2. Ручной сброс AP	103
3.1.3. Комбинированный сброс AP	104
3.2. Низкочастотная стабилизация тактовой частоты.	106
3.3. Высокочастотная стабилизация тактовой частоты	107
3.4. Умножение тактовой частоты	109
3.5. Тактирование AP от внешнего генератора	110
3.6. Управление загрузкой ОС	111
3.7. Идентификация изделия	112
3.8. Восстановление ОС и заводских настроек	114
Список использованных источников и литературы к главе 3	115

Глава 4. Схемы подачи питания

4.1. «Дерево питания» процессорной системы	116
4.2. Стабилизаторы напряжения LDO.	121
4.2.1. Общие сведения	121
4.2.2. Входные и выходные цепи	121
4.2.3. Управление сигналом <i>EN</i>	122
4.2.4. Управление сигналом <i>CE</i>	123
4.2.5. Вспомогательные выводы	124
4.2.6. Практические схемы применения LDO	125
4.3. Резервное питание.	128
4.4. Понижающие DC/DC-преобразователи (5 В)	129
4.5. Понижающие DC/DC-преобразователи (12 В)	133
4.6. Повышающие DC/DC-преобразователи	135
4.7. Организация подсветки TFT-дисплеев.	137
4.8. Подстройка напряжения питания.	138
4.9. Защита входных цепей питания 5 В.	140
4.10. Защита входных цепей питания 12 В	143
4.11. Питание от USB	144

4.12. Контроль тока и индикация напряжения.	145
4.13. Электронные предохранители и ограничители	147
4.14. Внешние контроллеры питания	149
4.15. Система питания внутри AP	153
4.16. Прочие схемы узлов питания.	155
Список использованных источников и литературы к главе 4	158

Глава 5. Схемы узлов вывода

5.1. Светодиодные индикаторы.	159
5.1.1. Одиночные светодиоды.	159
5.1.2. Одиночные светодиоды с буферными элементами.	160
5.2. Видеотехника.	162
5.2.1. TFT-дисплеи с интерфейсом MIPI DPI	162
5.2.2. TFT-дисплеи с интерфейсом MIPI DSI	166
5.2.3. TFT-дисплеи с интерфейсом LVDS.	168
5.2.4. Подключение SVGA-мониторов	172
5.2.5. Подключение цветных телевизоров	175
5.3. Звуковая система.	177
5.3.1. Вывод звука на громкоговорители	177
5.3.2. Вывод звука на головные телефоны	177
5.3.3. Звуковой линейный выход	181
5.3.4. Комбинированный вывод звука.	183
5.4. Силовая электроника	186
5.5. Прочие схемы узлов вывода	190
Список использованных источников и литературы к главе 5	192

Глава 6. Схемы интерфейсных узлов

6.1. Интерфейс RS-232.	193
6.2. Интерфейс RS-485.	196
6.3. Интерфейс I ² C	197
6.4. Интерфейс I ² S	199
6.5. Интерфейсы PCIe, mini PCIe	201
6.6. Интерфейс SATA.	203
6.7. Интерфейс S/PDIF	205
6.8. Интерфейс Ethernet	206
6.8.1. Общие схемы подключения	206
6.8.2. Трансформаторы Ethernet	210
6.8.3. Экранирование.	212
6.8.4. Светодиодная индикация Ethernet	213
6.9. Интерфейс JTAG.	215
6.10. Интерфейс UART	217
6.11. Часы реального времени RTC	219
6.12. Интерфейс HDMI	222
6.12.1. Базовые сведения.	222
6.12.2. Типовые схемы включения	223
6.12.3. Защита информационных цепей HDMI	225

6.12.4. Цепь питания HDMI	227
6.12.5. Удалённое управление по цепи <i>CEC</i>	228
6.12.6. «Горячее включение» HDMI	229
6.12.7. Шина I ² C HDMI	231
6.13. Интерфейс SIM-карты	233
6.14. Последовательный интерфейс MIPI CSI	234
6.15. Параллельный интерфейс для цифровых камер	237
6.16. Интерфейс USB 2.0	240
6.16.1. Общие сведения	240
6.16.2. Сигналы <i>D+</i> , <i>D-</i>	241
6.16.3. Сигнал <i>ID</i>	243
6.16.4. Питание внешних устройств через USB	244
6.16.5. Ограничители тока на транзисторах	245
6.16.6. Интегральные ограничители тока	247
6.16.7. Питание двунаправленного порта OTG	250
6.16.8. Хабы USB	251
6.16.9. Преобразователи интерфейса USB	253
6.17. Интерфейс USB 3.x.	254
6.18. Совместная работа AP и МК	258
6.19. Переключатели интерфейсов	260
6.20. Прочие интерфейсы	261
Список использованных источников и литературы к главе 6	264
Глава 7. Беспроводные ВЧ-интерфейсы	
7.1. Общие замечания	266
7.2. Модули GNSS	267
7.3. Модули Wi-Fi, Bluetooth	268
7.4. Антенные системы	271
Список использованных источников и литературы к главе 7	274
Глава 8. Хранение информации	
8.1. Микросхемы памяти EEPROM	275
8.2. Микросхемы памяти SPI-NOR Flash	276
8.3. Микросхемы памяти NAND Flash	277
8.4. Микросхемы памяти SDRAM	278
8.4.1. Общие схемы подключения	278
8.4.2. Тактовые сигналы <i>CK</i>	284
8.4.3. Цепь автокалибровки <i>ZQ</i>	284
8.4.4. Опорное напряжение <i>VREF</i>	285
8.4.5. Сигнал сброса	286
8.5. Микросхемы памяти eMMC	287
8.6. Карты памяти microSD	290
8.6.1. Разновидности держателей карт памяти	290
8.6.2. Подключение карт памяти к AP	291
8.6.3. Защитные цепи для карт памяти	293
8.6.4. Подача питания на карты памяти	295

Список использованных источников и литературы к главе 8	297
Глава 9. Схемы с нюансами	298
Список использованных источников и литературы к главе 9	302
Глава 10. Программная часть SBC	
10.1. Какие ОС используются в SBC?	303
10.2. Android — базовые сведения	304
10.2.1. Версии ОС Android	304
10.2.2. Методика разработки приложений	306
10.2.3. Каталоги, папки, файлы.	307
10.2.4. Раскладка памяти.	308
10.2.5. Файлы в ОС Android	309
10.2.6. Способы пересылки файлов	309
10.2.7. Способы установки приложений	310
10.2.8. Получение root-прав	311
10.3. Linux — базовые сведения.	311
10.3.1. История и философия	311
10.3.2. Термины и определения в Linux	312
10.3.3. Разновидности дистрибутивов	314
10.3.4. Linux и AP	315
10.4. Сравнение разных ОС для SBC	317
Список использованных источников и литературы к главе 10	318
Послесловие.	319
Приложения	
Приложение 1. Ссылки и адреса в Интернете	322
Приложение 2. Перечень ЭРИ	327
Приложение 3. Список аббревиатур	341

ВВЕДЕНИЕ

*Все вещи можно представить в виде чисел.
(Пифагор)*

Цифра «5» во многих культурах считается особенной. Например, в Древнем Китае выделяли пять основных металлов, пять форм материи, пять вкусов, пять священных гор, пять добродетелей, пять цветовых оттенков и даже пять нот в музыкальной гамме.

В Древней Греции было распространено философское учение математика Пифагора, в котором числа представлялись основой бытия, принципом взаимодействия искусства и природы. Цифра «5» в пифагорействе соединяет «тройку» (знак неба) и «двойку» (знак земли). Именно Пифагор обнаружил в пятиконечной звезде пропорции золотого сечения, в связи с чем посчитал пентаграмму геометрическим воплощением совершенства.

Пятиконечная звезда является знаком воинского отличия во многих странах мира. Присутствует она и в государственных гербах. Известны растения с пятилепестковыми цветами. В океанах и морях обитают морские звёзды, имеющие пятилучевую симметрию тела.

Человек имеет пять органов чувств — зрение, слух, обоняние, осязание и вкус. На руках и ногах у него по пять пальцев. Две руки, две ноги и голова образуют в пространстве пять опорных точек по образу звезды. Четыре нижних её луча означают четыре стихии — огонь, воздух, воду и землю, а пятый луч указывает на главенство разума человека над природой.

«Пятёрка» в нумерологии представляется «творчеством хаоса». Другими словами, озарение и изобретательность на грани риска, дополненные страстью к бесконечным спорам. По гороскопу таким людям предначертаны: творчество, находчивость, риск.

Есть поверье, что человек, в дате рождения которого присутствует цифра «5», счастлив от природы, и он сможет на любом «Титанике» волшебным образом получить персональную шлюпку спасения.

К чему такой пристальный анализ цифры «5»? К тому, чтобы подвести читателя к мысли: настоящая книга является *пятой* частью авторского сборника под общим названием «1000 и одна микроконтроллерная схема».

Книги сборника имеют сквозную нумерацию: «Выпуск 1» (2010 год), «Выпуск 2» (2011 год), «Выпуск 3» (2016 год), «Выпуск 4» (2017 год). Первые две книги представляют единое целое и посвящены основам микроконтроллерной техники. Третья и четвёртая книги дополняют материал новыми схемами, новыми методиками расчётов. Настоящая (пятая) книга позволяет перейти от микроконтроллеров (МК) к прикладным процессорам, чтобы расширить технический кругозор и не отставать от времени.

Содержание первых четырёх книг:

- «Выпуск 1» — раскрывается внутреннее устройство идеализированного МК, приводятся фрагменты электрических схем узлов тактирования, питания, ввода информации;
- «Выпуск 2» — приводятся схемы узлов вывода информации, подсистем памяти, интерфейсов, а также даётся краткий учебник по основам языка программирования С, широко применяемого эмбеддерами МК;
- «Выпуск 3» — описываются новинки последних лет, приводятся дополнительные схемы, касающиеся всех подсистем МК, рассматривается методика виртуального моделирования узлов в среде Micro-Cap;
- «Выпуск 4» — приводятся примеры схемных узлов, которые встречаются в реальных отладочных платах для разных семейств МК от разных фирм-изготовителей, систематизируются (впервые) конструктивные и дизайнерские решения в разводке печатных плат.

Настоящая книга, как в компьютерной игре, переносит читателя на более высокий уровень, когда вместо МК рассматриваются их старшие собратья — прикладные процессоры. Сокращение ПП для них не прижилось, поэтому далее в книге будет использоваться англоязычный термин «Application Processor» с аббревиатурой AP. Это позволит не путать прикладные процессоры с обычными МК, устанавливая определённый водораздел в сферах их применения.

Вместо отладочных плат, характерных для МК, будут рассматриваться одноплатные компьютеры (англ. SBC — Single Board Computer), или, по-другому, микрокомпьютеры. Они по внешнему виду похожи на отладочные платы с МК, но сложнее в начинке, поскольку содержат больше радиоэлементов, включая интерфейсные чипы, микросхемы памяти, интеллектуальные датчики, интегральные контроллеры питания.

Если внимательно приглядеться, то схемные приёмы для МК и AP в целом совпадают. Напрашивается вопрос: можно ли было назвать настоящую книгу «Выпуском 5»? Формально нет, ведь МК и AP согласно общепринятой классификации относятся к разным техническим группам. Тем не менее четыре прежние и одна новая книги подчиняются уравнению «4 + 1 = 5».

Пройденный в предыдущих книгах теоретический материал повторяться не будет. Для общего понимания достаточно освежить в памяти ранее полученные знания, чтобы «не танцевать от печки». А в качестве бонуса на сэкономленном месте будут размещаться новые электрические схемы, характерные для AP в составе SBC.

Стиль рисунков и подрисовочных подписей, подача материала и оформление первоисточников во всех пяти книгах остаются без изменений. К каждой схеме даются краткие текстовые пояснения, приводится перечень встречающихся на практике замен радиоэлементов.

Основное правило: электрические схемы и пояснения к ним должны располагаться на одном листе. Этим объясняется краткость изложения материала. Но с другой стороны, краткость должна побудить читателей к творчеству. Например, заставить внимательно проанализировать схему с карандашом в руке, найти сильные и слабые места, предложить свои варианты и не бояться заочно поспорить

с разработчиком фирменного решения. Для уверенности можно провести компьютерное моделирование фрагментов схем по методике из книги «Выпуск 3».

Названия подразделов, согласно которым сортируются схемы, совпадают с использовавшимися ранее в книгах «Выпуск 1...4». Однако то, что хорошо для МК, не факт, что хорошо для AP, и наоборот. В связи с этим в настоящей книге появились новые подразделы, которые характерны для схем с AP, а также были удалены подразделы, актуальные лишь для схем с МК.

Некоторые электрические схемы получились большими по размерам. Они могут занимать целую страницу книги, на типографском языке — целую полосу. Почему? Потому что особенностью AP является большое количество выводов на корпусе микросхемы, а также наличие на плате SBC многовыводных интерфейсных чипов и многоконтактных разъёмов. В таких случаях схемы лучше анализировать целиком, а не разбивать их на части, иначе может исчезнуть полезная информация о взаимодействии элементов друг с другом.

При написании книги не ставилась задача добиться абсолютно точного соответствия электрических схем с их фирменными оригиналами. Изменения имеются, но они, как правило, мелкие, чтобы не отвлекать внимание читателей от главного, от понимания принципа работы.

В теоретической части книги (глава 1) рассказывается о месте AP в иерархии вычислительных микросхем, описываются их отличия от МК, рассматриваются классификационные признаки и структурные схемы. Отдельным блоком размещается информация о внутреннем устройстве реальных SBC, содержащих AP.

В практической части книги (главы 2...9) представлен сборник электрических схем различных узлов: входных, выходных, комбинированных, интерфейсных, силовых, управляющих и т. д.

В программной части книги (глава 10) собраны основные сведения, касающиеся программирования SBC с использованием ОС Android и Linux.

В справочной части книги (приложения 1...3) приводится дополнительная информация о радиоэлементах, интерфейсах, протоколах, интернет-площадках, стандартах, терминах, а также о фирмах-изготовителях с указанием их интернет-адресов.

Ссылки на литературу и сайты даются отдельно в конце каждой главы согласно орфографии авторов. Для электрических схем первоисточниками являются даташиты SBC, которые свободно распространяются в Интернете. Схемы специально приводятся обезличенными, без привязки к SBC и фирмам. И вот почему.

Разработчики схем с AP многое заимствуют из схем с МК, используют известные из даташитов решения и опробованные в Интернете идеи. Более того, практически одинаковая схемотехника встречается в продукции абсолютно разных фирм, поэтому истинного (первого) автора установить сложно.

Фирмы-изготовители специально не делают секрета из электрических схем, ведь основная нагрузка ложится на плечи Firmware (фирменное ПО), которое сложно разработать самостоятельно, не зная тонкостей «тысячестраничных» даташитов. Кроме того, печатные платы SBC выполняются многослойными, ЭРИ в них применяются с шариковыми выводами. Следовательно, повторить топологию проводников на плате (а это очень важная вещь!), даже зная электрическую схему, весьма затруднительно.

Вся прелесть использования SBC как раз и заключается в том, что человек работает с уже готовым и протестированным устройством, свободным от любительских ошибок в виде взаимовлияния сигналов и помех по питанию. Ему остаётся лишь подключить к разъёмам внешние цепи и загрузить в AP прикладную программу, составленную на компьютере.

Порядок изучения материала в книге произвольный. Это своего рода энциклопедия, информация в которой носит справочно-познавательный характер.

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.

ОДНОПЛАТНЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ

*Жизнь — это то, что случается с нами,
пока мы строим планы на будущее.
(Томас Ла Манс)*

1.1. Зачем это нужно?

Все мы являемся путешественниками во времени. Кто-то путешествует в прошлое в мире исторических наук, кто-то путешествует в будущее в мире фантастики, а кто-то живёт настоящим, постепенно переходящим из прошлого в будущее.

Радиолобительство — это хобби, имеющее и прошлое, и настоящее, и будущее. Истинный радиолобитель находится в постоянном движении вперёд, изобретает что-то новое, улучшает промышленные конструкции, следит за перспективными направлениями в схемотехнике и программировании. Но время от времени ему приходится коренным образом переучиваться. Чтобы понять причину этого явления, надо обратиться к истории.

В середине XX века популярными среди радиолобителей были самодельные ламповые приёмники, передатчики, усилители, магнитофоны. Мастера, которые знали тонкости лампового дела, с недоверием отнеслись к вновь появившимся транзисторам. Но по мере поступления их в свободную продажу лёд тронулся, конструкции на транзисторах стали массовыми, превосходя ламповые устройства в размерах, параметрах, экономичности.

На следующем этапе переучиваться пришлось уже специалистам, которые досконально изучили транзисторную технику. Им предстояло освоить работу изделий, состоящих преимущественно из аналоговых и цифровых интегральных микросхем средней степени интеграции.

Дальше — больше, появились БИС, микропроцессоры, МК, АР, ПЛИС. Уважающий себя электронщик должен был переступить через свои «аппаратные» принципы и начать изучение «софта» вместе с языками программирования.

Психологическое восприятие новинок не всем даётся одинаково легко. В частности, многие талантливые радиолобители в начале 2000-х годов остановились на уровне транзисторов, операционных усилителей и логических микросхем. Барьер программирования МК для них оказался слишком сложным.

Но это было в «доардуиновскую» эпоху. Сейчас порог входа в сообщество программистов резко снизился. Многим школьникам по плечу заставить мигать светодиод в тестовом скетче Arduino. Тем, кто научился с помощью платформы Arduino азам программирования, повезло во всех отношениях. Им будет проще перейти на новую ступень своего развития и осилить работу АР.

1.2. Микрокомпьютеры

Компьютер, который помещается на ладони, — это уже далеко не фантастика. В частности, вычислительные возможности современных смартфонов выше, чем у топовых ПК 10-летней давности. Но смартфоны являются «вещью в себе». Их сложно модернизировать с паяльником в руках, у них отсутствует доступ к цифровым и аналоговым портам, к ним трудно подключить самодельную периферию. Здесь бы пригодилась малогабаритная плата размером с кредитную банковскую карту, которая по простоте управления напоминала Arduino, а по быстродействию и функционалу приближалась бы к смартфонам. И такие платы существуют. Называются они одноплатными компьютерами, или, по-другому, микрокомпьютерами. Но обо всём по порядку.

Первые компьютеры появились... 400 лет назад. Именно так! Дело в том, что в Средние века людей, которые профессионально занимались математическими вычислениями, называли «компьютерами» (англ. computers). В наши годы на смену «человеку-компьютеру» пришли вычислительные машины. Как следствие скорость, глубина и точность расчётов значительно увеличились. Современный компьютер делает успехи в области искусственного интеллекта, робототехники, виртуальных миров, научных исследований. Соперничать с машиной бесполезно в исконно «человеческих» спортивных играх — шахматах, шашках, игре го.

Как известно, компьютер состоит из материнской платы, к которой подключаются внешние элементы, а именно блок питания, монитор, жёсткий диск, клавиатура, мышь и прочая периферийная техника. Логично, что микрокомпьютером следовало бы назвать очень малый по габаритам компьютер.

Если приглядеться, то на эту роль хорошо подходит смартфон. Он небольшой по размерам. Внутри имеется миниатюрная материнская плата с процессором, к которой подключаются: сенсорный дисплей (выполняет функции монитора, клавиатуры и мыши), внешняя карта памяти (аналог жёсткого диска), аккумулятор (сетевой блок питания), периферийные датчики (кнопки, гироскоп, видеокамера, сенсор отпечатка пальца), исполнительные устройства (вибромотор, громкоговорители, фотовспышка), радиоустройства (GSM, Wi-Fi, Bluetooth, GPS).

Однако смартфон редко называют микрокомпьютером. Зато за платами, аналогичными Raspberry Pi (далее RPi), названия «микрокомпьютер» или «одноплатный компьютер» закрепились в качестве нарицательных. С технической точки зрения, это вполне логично, ведь RPi представляет собой малогабаритную материнскую плату с процессором, памятью и интерфейсными чипами.

По краям платы установлены разъёмы. Если к ним подключить через кабели монитор, блок питания, мышь, клавиатуру, то получится небольшой ПК. Без этих устройств плата RPi ни на что не годится, разве что, как шутят электронщики, для обогрева рук в качестве мощного резистора.

Термин «микрокомпьютер» в разные годы обозначал разное:

- 1956 год — первое упоминание в фантастическом рассказе Айзека Азимова «The Dying Night»;
- 1960...1970-е годы — небольшие вычислительные комплексы для научных экспериментов;

- 1970...1980-е годы — восьмибитные компьютеры индивидуального пользования «Apple-II», «Commodore-64», «ZX-Spectrum»;
- 1980-е годы — микросхемы фирмы Hitachi с говорящим названием «SuperH microcomputer SH7000 series»;
- 1990-е годы — самодельные «телевизионные» компьютеры, которые массово изготавливались радиолюбителями стран СНГ: «Радио-86ПК», «Специалист», «Орион-128», домашние клоны «ZX-Spectrum»;
- 1990...2000-е годы — процессорные модули управления для бытовой и автомобильной техники;
- 2010-е годы — новая реинкарнация старого термина. Теперь к микрокомпьютерам стали относить одноплатные системы, подобные RPi, с малыми габаритами, низким потреблением энергии, мощным процессором, развитой периферией и установленной ОС. Однако технические специалисты вместо названия «микрокомпьютер» чаще используют другой термин — «одноплатный компьютер», или в англоязычном сокращении SBC, что более коротко. Это название и будет употребляться далее по тексту.

1.3. Области применения SBC

Говоря о прогрессе в области SBC, можно провести параллели с динамикой естественного развития человеческого мозга. К настоящему времени SBC постепенно начинает «понимать», что его окружает, он может «изучать» информационные потоки и «представлять», к каким последствиям приведут его действия в будущем. Аналогия с развитием подростка, который находится в начале своего жизненного пути.

Анализируя просторы Интернета, можно составить перечень типовых задач, решаемых с помощью SBC, и очертить реальные области применения:

- домашний веб-сервер;
- система управления «умным домом»;
- файловая торрент-качалка;
- телевизионный медицентр;
- цифровой интернет-радиоприёмник;
- игровая ретроприставка;
- бесшумный домашний ПК с портами GPIO;
- маршрутизатор с портами GPIO;
- контроллер встраиваемых систем;
- автомобильный помощник;
- интеллектуальные датчики;
- роботизированные устройства, в том числе БПЛА.

Как видно, области применения разные, но большинство из них так или иначе связаны с мультимедиа, беспроводной связью и Интернетом.

1.4. Разновидности SBC

Все SBC можно условно разделить на две большие группы: классические и бытовые. Под классическими понимаются «радиолюбительские» SBC наподобие RPi, которые поставляются в виде платы без корпуса и которые можно встроить в конструируемое устройство. Именно они будут основой дальнейшего изучения.

Однако существуют и другие, в чём-то похожие, а в чём-то нет, микрокомпьютерные системы. Речь пойдёт о заводских изделиях, имеющих дизайнерский корпус, малые габариты и «заточенных» на выполнение определённого класса задач. Условно их можно отнести к группе бытовых SBC.

Показательный пример — ТВ-бокс (TV-Box). Это малогабаритная приставка, подключаемая к телевизору через гнезда HDMI, USB и превращающая его в мультимедийный центр с доступом к Интернету. Основой ТВ-бокса является одноплатная конструкция с AP, чипами памяти и сервисными микросхемами. Питание поступает от разъёма USB или от сетевого адаптера. Функции приставки урезаны, количество интерфейсов минимальное. Прямого доступа к портам ввода/вывода AP у пользователя нет. Да этого и не требуется, ведь ТВ-бокс рассчитан на эксплуатацию рядовым телезрителем, а не электронщиком.

Аналогичная ситуация со «стиком» Intel Compute Stick на базе однокристалльной системы Intel Atom x5-Z8300. В нём имеются разъёмы HDMI, USB, PCIe, к которым можно подключить: монитор, диск памяти, клавиатуру, мышь, модемы Wi-Fi или Ethernet с доступом к Интернету. Такой модуль по производительности вполне может заменить ПК начального уровня для набора текста, рисования картинок, просмотра фото- и видеоматериалов, а также сёрфинга во Всемирной паутине. Преимущество — бесшумная работа и малые габариты. Однако устройство рассчитано на рядового пользователя ПК, а не на электронщика.

Беспроводные модемы, маршрутизаторы, роутеры также строятся на базе AP и сетевых процессоров (Network Processors). Но для большинства потребителей они являются бытовыми изделиями, работающими по принципу: «Включил, настроил и забыл». Самоделщики пользуются тем, что платы таких модемов часто содержат дополнительные внутренние разъёмы, через которые можно получить доступ к портам AP. Однако здесь требуются специфические знания и опыт, что не всем электронщикам под силу.

Считается, что классические SBC проще в изучении, поэтому, «не изобретая велосипед», именно с них и следует начать введение в схемотехнику AP.

1.5. Отличия между SBC и отладочными платами с МК

К отладочным в данном случае относятся платы, базирующиеся на МК, внутреннее устройство которых подробно рассматривалось в «Выпуске 4». Если сравнивать их с SBC, то можно выделить следующие формальные отличия.

Во-первых, в SBC для вывода информации используются не светодиоды и строчные ЖКИ, а телевизоры, мониторы, цветные TFT-дисплеи.

Во-вторых, в SBC органами управления служат не кнопочные тастатуры и энкодеры, а клавиатуры, мыши, ПДУ, геймпады, 3D-перчатки, сенсорные экраны.

В-третьих, в SBC выход в Интернет осуществляется через встроенные модули Wi-Fi и Ethernet, а не с применением дополнительных шилдов.

В-четвёртых, в SBC прикладные программы устанавливаются поверх ОС, а не напрямую в память программ.

Перечисленные отличия касаются сопоставимых между собой SBC и отладочных плат с МК среднего ценового диапазона. В остальном их характеристики примерно одинаковые. И SBC, и отладочные платы с МК являются малогабаритными самодостаточными устройствами, собранными на печатных платах без корпуса. Они имеют разъёмы для подключения периферии, местную светодиодную индикацию и технологические кнопки управления (Рис. 1.1 и 1.2). На программном уровне их объединяет простота разработки ПО и наличие экосистемы с большим сообществом энтузиастов в Интернете.

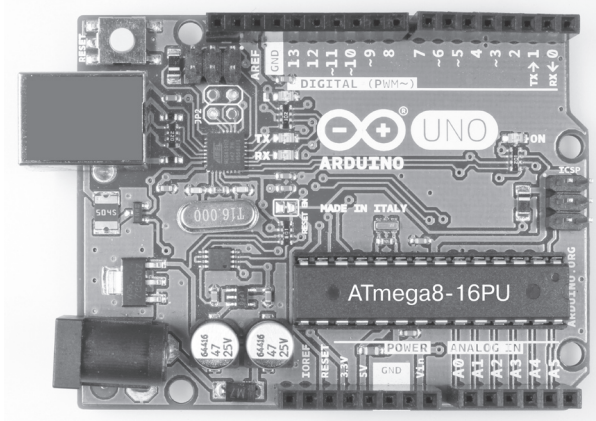


Рис. 1.1. Внешний вид отладочной платы с МК (Arduino UNO)

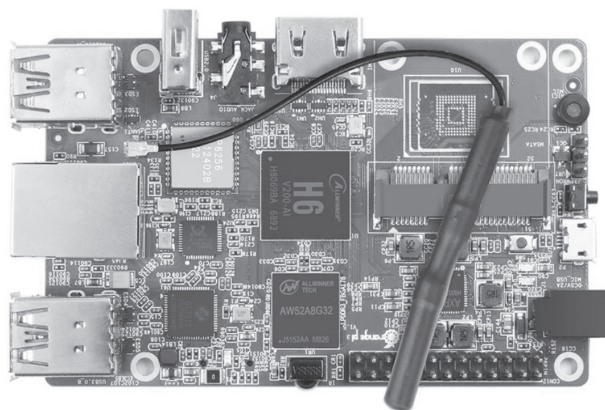


Рис. 1.2. Внешний вид SBC (Orange Pi Lite2)

Главное отличие, от которого пути расходятся в разные стороны, заключается в центральном процессорном чипе, поскольку в отладочных платах применяются МК, а в SBC используются AP.

1.6. Подробный анализ AP

1.6.1. Терминология

МК, согласно стандартному определению, — это микросхема, предназначенная для управления электронными устройствами. Если считать МК началом отсчёта, то лучшие параметры будут иметь AP, а ещё лучшие — высокопроизводительные процессоры, применяемые в ПК и ноутбуках (**Рис. 1.3**).

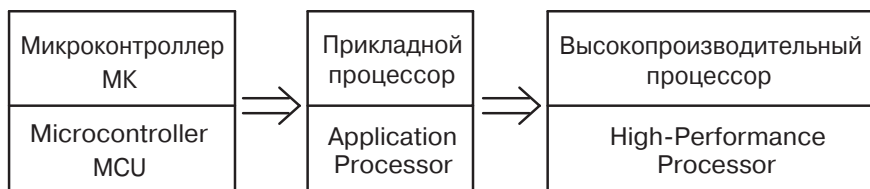


Рис. 1.3. Иерархия процессорных устройств

Как видно, AP занимают промежуточное место в представленной процессорной иерархии. Справедливости ради, классификация и терминология в данной области ещё до конца не устоялись.

Как правильно сказать по отношению к AP — «прикладной процессор» или «процессор приложений»? И в первом, и во втором случаях употребляется англоязычная аббревиатура AP. Но для «прикладного процессора» это сокращение от «Application Processor», а для «процессора приложений» — сокращение от «Applications Processor» [1-1]. Разница заключается в одной лишь букве «s», на что редко обращают внимание переводчики. Поэтому даже в ГОСТ Р 56947—2016 термин «network capable application processor» переводится фразой «сетевой процессор приложений», а не «сетевой прикладной процессор».

Изготовители микросхем AP единого стандарта в терминологии между собой не выработали. Например, фирмы Qualcomm, Allwinner, Rockchip, Marvell, Renesas называют свои процессоры «Application Processor», а фирмы NXP Semiconductors, Freescale Semiconductor — «Applications Processor». Фирма Seiko Epson использует словосочетание «Single Chip Microcomputer». Дальше всех пошли разработчики фирмы Texas Instruments, у которых в даташитах на AP встречаются названия: «Applications Processor», «Processor», «Multimedia Device», «Heterogeneous Multicore SoC», а на сайте [1-2] упоминается семейство «Arm-based application processors». Поди разберись, как правильно!

Интересный момент. На просторах Интернета в поисковой системе Google англоязычный термин «Application Processor» используется гораздо чаще, чем «Applications Processor». С другой стороны, русскоязычный термин «прикладной процессор», наоборот, встречается в поисковике Google значительно реже, чем «процессор приложений». Поэтому предлагается компромиссное решение — оба русскоязычных термина заменить одной универсальной англоязычной аббревиатурой AP, что и сделано в настоящей книге.

1.6.2. Историческая справка

Первые процессоры приложений появились в 1990-е годы в аппаратных серверах фирмы IBM. Так, в 1994 году было объявлено о серверном приложении, выполнявшемся на плате FSIOP (File Server I/O Processor), где находился процессор Intel 486 и память для его обслуживания [1-3]. Выполнение файл-серверных приложений впервые перекладывалось на логически изолированный вспомогательный процессор (процессор приложений), размещавшийся на отдельной печатной плате в целях повышения производительности системы.

Массовое внедрение AP в бытовую технику началось в 2000-годы, в период становления индустрии смартфонов. Как известно, базовым элементом смартфона служит главный процессорный чип, он же AP, который используется для первичной обработки данных, вычислительных и интерфейсных функций. Чип называется «главным», поскольку он работает в связке со вспомогательными чипами, которые выполняют фоновые операции, такие как вывод информации на дисплей, управление беспроводной связью, контроль и оптимизация энергоресурсов.

Первые смартфоны выпускались разными фирмами, но по схожей схемотехнике и с одинаковыми AP из семейства OMAP фирмы Texas Instruments. Такая унификация применялась в мультимедийных телефонах и планшетах фирм Nokia, Motorola, LG, Panasonic, Sony Ericsson, Archos. На практике AP семейства OMAP пользовались успехом на рынке мобильных устройств в 2003...2011 годах, после чего их нишу заняли более мощные AP семейства Qualcomm Snapdragon.

Впоследствии AP, применяемые в смартфонах, выделились в отдельный класс Mobile Application Processors — процессоры мобильных приложений. Они представляют собой специализированные системы на кристалле (SoC), предназначенные для поддержки приложений, работающих в среде мобильных ОС.

1.6.3. Первичная классификация AP

Все AP можно условно разделить на мобильные, специализированные и универсальные.

Мобильные AP чаще всего ассоциируются с процессорами Apple A4...A15, которые устанавливаются в разных моделях iPhone начиная с 2008 года. Их электрические схемы разрабатывает фирма Apple, но сами чипы изготавливаются на производственных мощностях и по технологическим нормам корейской фирмы Samsung и тайваньской фирмы TSMC. Применяются «яблочные» AP исключительно в «яблочных» мобильных устройствах: iPhone, iPad, iPod, Apple Watch, HomePod, а также телевизионных приставках Apple TV [1-4].

Специализированные AP «заточены» под промышленные интерфейсы, применяемые в технологическом оборудовании. Типичный пример — линейка гетерогенных AP AM6411... AM6442 Sitara фирмы Texas Instruments. Используются в ПЛК и приводах двигателей, где требуются быстрая коммуникация и обработка данных в реальном времени. Неполный перечень поддерживаемых интерфейсов: Profinet RT, EtherNet/IP, EtherCAT, Sigma-Delta filters, Multi-protocol position encoder, Enhanced Capture, Enhanced PWM, Enhanced Capture, Enhanced Quadrature Encoder Pulse, Modular Controller Area Network и т. д. Внутренние средства мультимедиа и доступ к Интернету в специализированных AP могут отсутствовать.

Универсальные AP функционируют в различных условиях. Они не привязываются ни к мобильной аппаратуре, ни к промышленным интерфейсам. Обычно их применяют в качестве улучшенной замены МК во встраиваемых системах — от автомобильных и полётных контроллеров до интеллектуальных датчиков и бытовых приборов «умного дома». Считается, что универсальные AP хорошо выполняют мультимедийные функции, обеспечивая баланс между производительностью, ценой и энергопотреблением. Как следствие универсальные AP рекомендуются для начинающих пользователей, и именно они будут анализироваться дальше.

1.6.4. Водораздел между МК и AP

Существуют определённые функциональные критерии, которые позволяют отнести ту или иную микросхему к категории МК или AP. Если руководствоваться философским принципом «бритвы Оккама» (оставлять только самое важное), то главные базовые различия можно сосчитать на пальцах одной руки.

Во-первых, AP, в отличие от МК, должен представлять собой «систему на кристалле» SoC (System-on-a-Chip), или, по-русски, СнК (Система на Кристалле). Чип SoC можно представить в виде компьютерного мини-завода на полупроводниковой подложке. Тут и процессорные ядра, и блоки памяти, и графический ускоритель, и аудиовидеомодули, и контроллеры интерфейсов, и даже беспроводные ВЧ-модемы. Такой конгломерат позволяет не только увеличить быстродействие, но и сделать конструкцию компактной, технологичной и более дешёвой.

Во-вторых, процессорная часть AP, в отличие от МК, должна быть мультикластерной или гетерогенной, т. е. содержать внутри себя по крайней мере два функционально разных элемента (кластера, процессора). Например, основной четырёхъядерный процессор платформы Cortex и восьмиядерный графический процессор платформы Mali.

Интересный нюанс. В качестве классификационного параметра выбрано именно количество кластеров, а не ядер, поскольку появились новые МК с многоядерной архитектурой. Правда, ядра у них однотипные, строго вычислительные, конвейерного типа.

В-третьих, различие в тактовой частоте. Чем она выше, тем быстрее функционирует устройство. Первые МК работали на тактовых частотах, не превышающих десятки мегагерц. В дальнейшем этот показатель вырос до сотен мегагерц с использованием внутренних умножителей частоты. В противовес этому тактовые частоты AP сразу начинались с планки в несколько сотен мегагерц с дальнейшим её увеличением до единиц гигагерц. Налицо различие параметра на порядок.

Представляется рациональным установить водораздел между МК и AP на уровне условной тактовой частоты 1 ГГц. Цифру «1» легко запомнить. Если тактовая частота ниже 1 ГГц, то классифицируется как МК, иначе — как AP. Это справедливо для микросхем общего применения по состоянию на 2022 год. Разумеется, могут быть исключения, но они только подтверждают правило.

В-четвёртых, различие в базовом построении программной части. Речь идёт про ОС. Стандартные МК функционируют вообще без ОС через прикладные программы с гибкой логикой, но с одной выполняемой задачей. Более «продвинутые» в техническом плане МК позволяют загружать в память небольшие ОС реального

времени (сокращённо ОСРВ, или, по-английски, RTOS — Real-Time Operating System), например FreeRTOS, Femto OS, Aqua и т. д.

Микроконтроллерные ОСРВ могут выполнять параллельно несколько простых задач. Однако для полноценной работы ОС компьютерного типа ресурсов МК уже недостаточно. Это парафия AP. Здесь требуется большой объём памяти, повышенное быстродействие и поддержка технически сложных интерфейсов на аппаратном уровне. Примеры ОС для AP: Android, Linux, Palm OS, OpenWRT, Symbian, а также оптимизированные разновидности Microsoft Windows.

1.6.5. Обобщённая структурная схема AP

Среднестатистический AP по внутреннему устройству на порядок сложнее среднестатистического МК. Следовательно, подробная структурная схема AP будет гораздо запутаннее, чем у МК. В связи с этим в даташитах приводятся лишь обобщённые блок-схемы AP с перечнем узлов, блоков, ядер, интерфейсов, шин, но с минимумом внутренних связей.

Существует неофициальный «дресс-код» для подобных блок-схем. Рисунок выполняется в пределах прямоугольника, обозначающего физические границы AP. Внутри прямоугольника «стопками» размещаются блоки процессорных, интерфейсных и периферийных узлов. Эти блоки собираются в подгруппы (части) по функциональным признакам и окаймляются общим заголовком, к примеру Processors, Internal Functions, Multi-Media Processor, Memory, System Peripheral, Connectivity и т. д.

Но на этом унификация, к сожалению, заканчивается. Разные фирмы по-разному видят вторичные классификационные признаки, позволяющие отнести однотипные блоки к определённым группам. Их названия отличаются у разных изготовителей, единой нормативной базы или корпоративного соглашения нет.

Если сопоставить между собой структурные схемы различных AP, то все входящие в них компоненты можно разделить на пять базовых частей, в порядке значимости: процессорная, служебная, системная, мультимедийная и интерфейсная (Рис. 1.4).

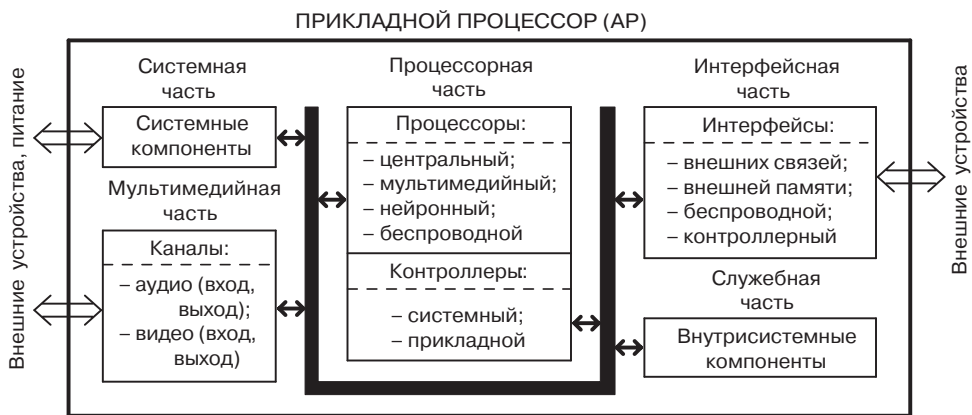


Рис. 1.4. Обобщённая структурная схема AP

Процессорная часть занимается вычислениями, обработкой и хранением информации, ускорением и распараллеливанием процессов, а также кодированием и декодированием данных, разрешением конфликтных ситуаций на шинах. Процессорная часть содержит несколько процессоров (англ. CPU — Central Processing Unit, вычислительное ядро) и контроллеров (англ. Controller — менее мощные устройства для локального управления и контроля). Процессоры в AP должны присутствовать обязательно, а контроллеры — факультативно.

Служебная часть включает в себя совокупность шин, магистралей, ячеек памяти, регистров, дешифраторов, мультиплексоров и прочих элементов, тесно взаимодействующих с процессорной частью. Отличительная особенность: блоки служебной части не имеют прямого выхода на внешние контакты чипа AP.

Системная часть на логическом уровне представляет собой аналог служебной части, но её входы и выходы имеют прямой доступ к внешним контактам чипа AP. Сюда относятся: узлы начального сброса, тактирования, отладки, программирования, формирования прерываний, генерации тактовых частот, а также блок внутреннего распределения питания.

Мультимедийная часть, по определению, занимается обработкой аудиовизуальной информации и представлением её в доступной для человека форме. На контакты чипа AP выводятся или аналоговые сигналы звука и изображения, или шины цифровых логических сигналов. Последние, как правило, требуют согласования, защиты, преобразования и конвертации во внешних микросхемах. Далее к SBC через разъёмы могут подключаться: мониторы, телевизоры, музыкальные центры, фото- и видеокамеры, УМЗЧ и т. д.

Интерфейсная часть решает задачу стыковки доступных в конкретном AP интерфейсов с внешним миром на аппаратном и логическом уровнях. Состав блоков в этой части широко варьируется. Например, интерфейс беспроводной связи подразумевает радиочастотную технологию, которая доступна далеко не всем фирмам-изготовителям. А вот интерфейс подключения внешней памяти является органическим атрибутом всех AP, иначе теряются преимущества, связанные с программной установкой ОС.

1.6.6. Внутренние и внешние интерфейсы

Интерфейс (англ. interface) — это граница между двумя функциональными объектами, требования к которой определяются стандартом. Применительно к AP различают внутренние и внешние интерфейсы.

Для рядового пользователя внутренние интерфейсы, которые находятся на границе процессорной и служебной частей AP, большого интереса не представляют. Это зона ответственности профессиональных разработчиков ядер и процессорных архитектур. Куда более важными для практики являются внешние интерфейсы, при помощи которых AP контактирует с окружающей средой через системную, мультимедийную и интерфейсную части.

Внутри AP имеется несколько специализированных электрических шин, охватывающих весь комплекс элементов системы. В даташитах AP они иногда показываются, иногда упоминаются, иногда подразумеваются. Шины имеются как во внутренних, так и во внешних интерфейсах. На **Рис. 1.4** они условно показаны

одной общей утолщённой линией, но в дальнейшем при разрисовке блок-схем анализируемых AP шины будут отсутствовать, чтобы не загромождать графику.

Если внимательно присмотреться, то названия элементов в разных частях AP созвучны друг с другом. Например, мультимедийный процессор и мультимедийные интерфейсы, процессор беспроводной связи и интерфейс беспроводной связи, прикладные контроллеры и контроллерные интерфейсы. Совпадение названий не случайно, поскольку указывает на их тесную физическую взаимосвязь: процессоры отвечают за логику, а интерфейсы — за протоколы.

1.6.7. Примеры реальных AP

Постулат — это утверждение, принимаемое без доказательства. В качестве постулата можно принять утверждение, что все фирмы-изготовители AP в документации по-разному отображают внутреннее устройство своих изделий. Анализ нескольких, наугад взятых даташитов AP свидетельствует о том, что единого стандарта действительно не существует.

Учитывая этот факт, в настоящей книге все фирменные блок-схемы AP приводятся к однообразному и унифицированному виду для лучшего понимания функциональных возможностей и облегчения поиска отличий.

Для дальнейшего анализа отобраны следующие AP:

- OMAP4430 фирмы Texas Instruments (**Рис. 1.5**);
- RK3566 фирмы Rockchip Electronics (**Рис. 1.6**);
- APQ8016 фирмы Qualcomm Technologies (**Рис. 1.7**);
- i.MX 8QuadMax фирмы NXP Semiconductors (**Рис. 1.8**).

Все перечисленные AP были разработаны в разные годы. Они содержат разные наборы интерфейсов, имеют разные технические параметры. Однако, несмотря на большие отличия, их внутреннее устройство достаточно легко структурируется в едином стиле.

Нарисовать блок-схему AP в виде прямоугольников — это полдела. Дополнительно надо хотя бы кратко дать текстовые пояснения о назначении входящих в схему элементов с учётом следующих особенностей:

- знаком «x» обозначается количество однотипных каналов, модулей, портов, интерфейсов, например «SPIx4» — это четыре канала интерфейса SPI;
- разделительный символ «@» по аналогии с адресом электронной почты означает английский предлог «at» (рус. «при, на, у, к»). Это условность, позволяющая визуально отделить текст от физического параметра, например от частоты «@533 МГц», скорости передачи данных «@1 Gb/s» и т. д.;
- названия AP указываются сокращённо, по образцу RK3566, OMAP4430, без названия фирмы. Технические описания AP приводятся в их даташитах на сайтах, указанных по ссылкам из **Табл. П2.1** приложения 2;
- описание спецификаций, протоколов и интерфейсов, которые поддерживают рассматриваемые AP, не входит в задачу настоящей книги. Для их изучения следует воспользоваться ссылками из **Табл. П1.2** приложения 1.

1.6.8. Структурная схема OMAP4430

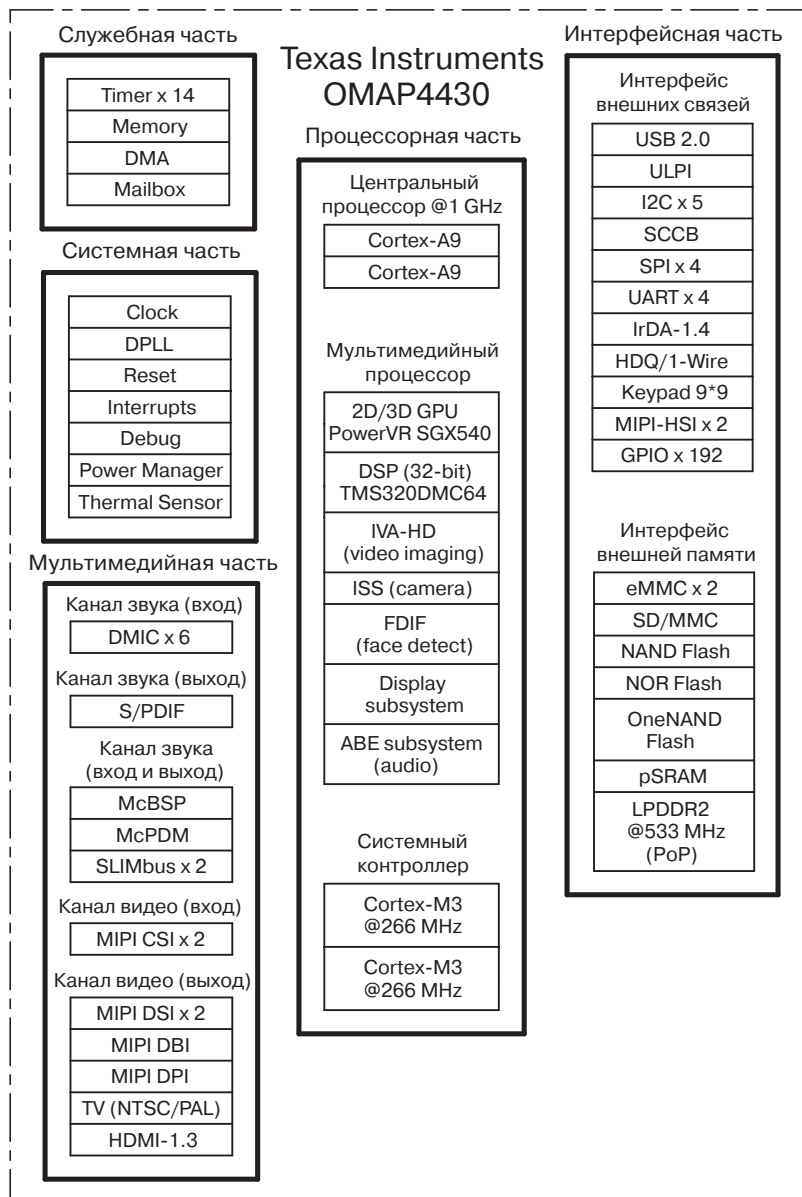


Рис. 1.5. Внутреннее устройство OMAP4430

OMAP4430 — это высокопроизводительный AP фирмы Texas Instruments, относящийся к платформе OMAP (Open Multimedia Application Platform) [1-5]. Первая цифра «4» в названии AP обозначает порядковый номер платформы, а именно OMAP 4.

Чипы первых трёх платформ OMAP 1...3 применялись в «древних» мобильных телефонах и простых интернет-устройствах. Их сложно отнести к полноценным AP ввиду слабых технических характеристик и низкой тактовой частоты (меньше 1 ГГц). По классификации это промежуточное звено между МК и AP.

На чипах, входящих в более современные платформы OMAP 4 и OMAP 5, построены достаточно известные смартфоны и планшеты — Samsung Galaxy Tab 2, BlackBerry Z10. В своё время они были в топе рейтингов. Технологические нормы изготовления AP семейства OMAP 4 составляют 45 нм, OMAP 5 — 28 нм.

Габаритные размеры корпуса OMAP4430 12×12 мм, на нижней части которого расположены 547, а на верхней — 216 шариковых контактов BGA с шагом 0.4 мм.

Чип OMAP4430 используется в следующих SBC: phyCORE-OMAP4430 фирмы PHYTEC Messtechnik и PandaBoard System сообщества Pandaboard.org.

Структурная схема OMAP4430 нарисована в унифицированном виде согласно его даташиту [1-6] и состоит из процессорной, служебной, системной, мультимедийной и интерфейсной частей.

● ПРОЦЕССОРНАЯ ЧАСТЬ OMAP4430

Процессорная часть содержит три группы элементов — два процессора и один контроллер. Назначение входящих в них блоков (сверху вниз по схеме).

Центральный процессор

Cortex-A9 (два ядра) — 32-разрядный RISC-процессор архитектуры ARMv7 с двумя ядрами Cortex-A9, работающий на частоте 1 ГГц. Каждое ядро содержит векторный сопроцессор Neon, выполняющий инструкции Advanced SIMD, и модуль FPU для ускорения вычислений с плавающей запятой. Объём внутренней памяти: 64 КБ кеш L1 на каждое ядро, 1 МБ общий кеш L2, 48 КБ загрузочное ПЗУ.

Мультимедийный процессор

GPU 2D/3D PowerVR SGX540 — Graphics Processing Unit — одноядерный графический процессор с ядром PowerVR SGX540 фирмы Imagination Technologies, обрабатывающий 2D- и 3D-изображения в два потока. Тактовая частота 304 МГц. Количество вершинных и пиксельных шейдеров составляет, соответственно, два и четыре. Поддерживаются протоколы: Direct3D Mobile, OpenGL-ES 2.0, OpenVG 1.1, OpenMAX.

DSP (32-bit) TMS320DMC64 — Digital Signal Processor — ядро 32-битного цифрового сигнального процессора (DSP) семейства TMS320 фирмы Texas Instruments. Служит для ускорения обработки звука, изображения и видео. Содержит четырёхканальный ассоциативный кеш ОЗУ L1 объёмом 32 КБ и восьмиканальный ассоциативный кеш ОЗУ L2 объёмом 128 КБ.

IVA-HD (video imaging) — Image and Video Accelerator-High Definition — аппаратный мультимедийный ускоритель высокого разрешения. Базируется на ядре 32-разрядного МК ARM968E-S фирмы ARM. Возможности ускорителя: обработка видео в формате Full HD 1080p@30 Гц, режим замедленной съёмки, захват изображений, транскодирование в формате 720p, организация видеоконференций с разрешением 720p. Поддерживаемые форматы: MPEG-1...4, Divx 5.02, H.263, H.264 BL/MP/HP, Stereoscopic Video, JPEG, RealVideo 8/9/10.

ISS (camera) — Imaging SubSystem — обрабатывает данные, поступающие с цифровой камеры разрешением до 16 Мп. Подсистема ISS отвечает за видеоискатель камеры, запись видео с цифровым зумом и вращением, обработку неподвижных изображений RGB и YUV, компенсацию уровня чёрного, гамма-коррекцию. Пропускная способность до 200 Мп/с по 128-битной шине данных. Содержит два программируемых процессора изображений, которые работают в плотной связке с одним из системных контроллеров Cortex-M3, входящих в процессорную часть.

FDIF (face detect) — Face Detect Invariant Filtering — модуль обнаружения лиц на изображении формата QVGA с 8-битной яркостью. Для обработки изображения 320×240 пикселей требуется 75 КБ памяти SDRAM. Модуль содержит встроенные ОЗУ и ПЗУ, взаимодействует с ЦП Cortex-A9, DSP и системными контроллерами Cortex-M3, входящими в процессорную часть.

Display Subsystem — подсистема дисплея. Обеспечивает взаимодействие с буфером кадров системной памяти SDRAM. Возможности: поддержка аппаратного курсора, независимая гамма-коррекция, программируемое чередование фаз цвета, кодирование стереоскопического 3D-видео с разрешением 720p. Допустимые форматы: RGB, ARGB, YUV. Вывод сигналов может производиться на 8-битный монохромный ЖКИ, на 24-битный цветной TFT, на телевизор стандартов NTSC и PAL, на устройства, поддерживающие протоколы HDMI, MIPI DSI.

ABE subsystem (audio) — Audio Back-End — звуковая подсистема. Возможности: буферизация аудиосемплов, микширование с голосовой дорожкой или микрофоном, эквалайзер, 3D-эффекты, усиление басов. Содержит внутреннюю память ОЗУ объёмом 64 КБ и ПЗУ объёмом 24 КБ. Поддерживаются периферийные интерфейсы: I²S, S/PDIF, MIPI SLIMbus, DMIC (цифровой микрофон), McPDM с многоканальной ШИМ для вывода стереозвука через внешний аудиочип TWL6040 фирмы Texas Instruments.

Системный контроллер

Cortex-M3 (два ядра) — два упрощённых ядра 32-разрядных МК платформы Cortex-M3. Тактовая частота 266 МГц. Предназначены для обработки мультимедиа в блоках ISS, FDIF, а также реагирования на фоновые и аварийные события в режиме реального времени. Контроллеры работают в связке с ЦП Cortex-A9, позволяя разгрузить последний от рутинных операций умножения, деления и исполнения инструкции Thumb и Thumb-2. Считается, что в оптимально составленной прикладной программе два мощных ядра Cortex-A9 могут использоваться для веб-сёрфинга с загрузкой картинок и «тяжёлых» вычислений, тогда как энергоберегающие ядра Cortex-M3 активируются при решении более простых задач.

• СЛУЖЕБНАЯ ЧАСТЬ ОМАР4430

Служебная часть содержит четыре блока, сигналы которых не выходят напрямую за пределы AP. Их назначение (сверху вниз по схеме).

Timer (14 таймеров) — цифровые таймеры. Таймеры в AP и МК — это устройства, которые вырабатывают определённые логические сигналы по истечении заданного интервала времени. Таймеры участвуют в генерации прерываний, в формировании сигналов ШИМ и меток времени. В ОМАР4430 имеется 14 таймеров, и все они 32-разрядные: 11 таймеров общего применения General-Purpose Timers,

два сторожевых таймера Watchdog Timers и один таймер часов реального времени 32-kHz Synchronized Timer. Тактируются все они от разных источников с частотой от 32 768 Гц до 38.4 МГц.

Memory — встроенная память. Практически во всех блоках на структурной схеме OMAP4430 присутствуют ячейки памяти ОЗУ и (или) ПЗУ небольшого объёма, порядка единиц-десятков килобайт. Раскладка памяти: верхний уровень иерархии памяти L1...L4 — четырёхуровневая кеш-память сверхбыстрого ОЗУ для ядер ЦП с целью буферизации транзакций, ПЗУ SAR-ROM (Save And Restore-Read Only Memory) для хранения и восстановления регистров при переходе в выключенный режим, загрузочное ПЗУ Boot ROM, которое обеспечивает начальный старт системы, ПЗУ eFuse, где хранятся заводские настройки и калибровки.

DMA — Direct Memory Access — прямой доступ к памяти. Обеспечивает быстрый обмен данными между устройствами и основной памятью AP, минуя ЦП. Поскольку данные не пересылаются в ЦП и обратно, то скорость передачи значительно увеличивается. Контроллер DMA в OMAP4430 поддерживает 127 запросов, 32 приоритетных логических канала и имеет 64-битную память FIFO. Существует также разделение в зависимости от источников запроса на аудио aDMA, системную sDMA и сигнально-процессорную eDMA.

Mailbox — почтовый ящик. Это узел, который обеспечивает интерфейс межпроцессорного взаимодействия в многоядерной системе. Почтовый ящик позволяет нескольким ядрам разделять ресурсы и обмениваться данными между собой. Управление почтовым ящиком производится с помощью прерываний, когда определённое ядро или процессор оставляет «сообщение», позволяющее претендовать на общий ресурс, если он доступен. Например, почтовый ящик, встроенный в подсистему IVA-HD, устанавливает двустороннюю связь между тремя внешними пользователями и одним внутренним пользователем. Эта связь обеспечивается тремя парами почтовых ящиков и FIFO с глубиной в четыре сообщения.

• СИСТЕМНАЯ ЧАСТЬ OMAP4430

Системная часть содержит семь блоков, сигналы которых так или иначе выводятся наружу. Их назначение (сверху вниз по схеме).

Clock — узел тактирования. Обеспечивает генерацию и распределение синхронизирующих сигналов внутри AP. Тактирование осуществляется через внешние контакты AP по ВЧ- и НЧ-каналам. К входам *XTAL_IN*, *XTAL_OUT* подключается основной кварцевый ВЧ-резонатор или генератор прямоугольных импульсов меандра частотой 12; 16.8 или 19.2 МГц. Вход *SLICER* служит для подачи синусоидального сигнала от внешнего генератора с низким фазовым дрожанием (джиттером) частотой 12; 16.8; 19.2; 26 или 38.4 МГц. Входы *SYS_32K* относятся к НЧ-части для подключения генератора частотой 32 768 Гц или «часового» кварцевого резонатора той же частоты для тактирования узла RTC (Real Time Clock).

DPLL — Digital Phase-Locked Loop — узел цифровой системы ФАПЧ. Предназначен для формирования внутренних частот методом дробного умножения (деления) на программно изменяемые коэффициенты. На вход ФАПЧ поступает тактовый сигнал *CLK* от осцилляторного узла. Получаемая на выходе сетка частот используется для синхронизации всех шин и узлов AP. В зависимости от выполняемой задачи частота синхросигналов может программно снижаться или увели-

чиваться. Некоторые тактовые импульсы системы ФАПЧ выводятся наружу через контакты *CLK[0:5]_OUT* на корпусе AP. Они имеют уровни КМОП и используются для синхронизации внешней периферии.

Reset — узел начального сброса. Внутренние блоки AP переходят в состояние сброса по внешнему сигналу, например от нажатия кнопки, или при наступлении определённых событий. В состоянии сброса программный счётчик и все системные регистры AP устанавливаются в исходные начальные состояния. Эти состояния однозначно определяют аппаратную конфигурацию, с которой AP начинает старт после включения питания. Не случайно второе название «состояния сброса» — состояние «начального запуска». Различают четыре источника событий, которые переводят OMAP4430 в состояние сброса: внешний сброс от кнопки, внутренний сброс при включении питания, внутренний сброс по сторожевому таймеру, внутренний сброс при появлении аварийных ситуаций.

Interrupts — система прерываний. Основана на таймерах, счётчиках, узлах обработки внешних и внутренних событий. Имеет прямую связь с 64 линиями GPIO, а значит, с контактами AP. Позволяет, в частности, реагировать на смену логического уровня на выбранной линии GPIO без её постоянного программного опрашивания.

Debug — система отладки и программирования. В OMAP4430 для этого используется интерфейс JTAG (Joint Test Action Group) в мультипроцессорном режиме, когда обеспечивается доступ к разным ядрам ЦП. Возможности отладчика: глобальный запуск и остановка одного или нескольких процессоров, синхронизация системы, отключение питания (снижение энергопотребления), соединение нескольких устройств для запараллеливания их работы, трассировка программного обеспечения по 256 каналам. Отладка физически осуществляется через порт IEEE1149.1 (JTAG) или IEEE1149.7 (дополнительное подмножество JTAG), сигналы которых выводятся на контакты AP.

Power Manager — менеджер питания. Это модуль управления питанием, который подстраивает тактовую частоту и напряжение в разных узлах AP в соответствии с требуемой производительностью. Динамическое масштабирование напряжений и частот касается всех блоков процессорной части: Cortex-A9, DSP, ABE и т. д. Менеджер питания анализирует диагностические сигналы, определяющие аварийное состояние устройства. Сигналы управления (выходы) и диагностики (входы) доступны на контактах AP. Внутри менеджера содержатся стабилизаторы LDO и транзисторный ИОН bandgap. Может работать с внешним контроллером питания PMIC, подобным чипу-компаньону TWL6030 фирмы Texas Instruments.

Thermal Sensor — температурный датчик. Внутри OMAP4430 имеется полупроводниковый датчик температуры кристалла. Измерение температуры производится в пределах $-40...+125^{\circ}\text{C}$ через внутренний АЦП с разрядностью 8 бит. Датчик температуры предполагает два режима работы: однократного и непрерывного преобразований. Узел термодатчика содержит компаратор, который срабатывает при превышении программно заданного порога температуры. Выходной сигнал компаратора *TSHUT* имеет ВЫСОКИЙ уровень во время нормальной работы и переходит в НИЗКИЙ уровень при перегреве. Этот сигнал выводится наружу на линию GPIO AP, следовательно, температурный датчик относится к системной, а не к служебной части AP.

• МУЛЬТИМЕДИЙНАЯ ЧАСТЬ ОМАР4430

Мультимедийная часть содержит пять групп элементов: входные, выходные, смешанные каналы звука, а также входные и выходные каналы видео. Назначение входящих в них блоков (сверху вниз по схеме).

Канал звука (вход)

DMIC — Digital MICrophone — связь с цифровыми микрофонами. К ОМАР4430 могут быть подключены или три стереофонических или шесть монофонических цифровых микрофонов. К каждому микрофону подводятся два сигнала: тактовый *DMIC_CLK* частотой 1.5...3.8 МГц (выход от AP) и информационный *DMIC_DIN* (вход в AP) с модуляцией плотности импульсов PDM. Принятый звуковой сигнал внутри AP проходит цифровую фильтрацию и распределение по каналам. Данные хранятся в буфере FIFO, который управляется запросами прерывания IRQ прямого доступа к памяти DMA. Частота дискретизации звука 88; 96 или 192 кГц.

Канал звука (выход)

S/PDIF — Sony/Philips Digital InterFace, или Sony/Philips Digital Interconnect Format — последовательный интерфейс «точка—точка» для передачи цифровых аудиоданных методом ИКМ на звуковоспроизводящее устройство. Пакет передаваемых данных имеет длину 32 разряда, из них первые восемь разрядов являются служебными, а остальные 24 разряда содержат полезный сигнал, который обрабатывает процессор. В ОМАР4430 используется промышленная версия стандарта S/PDIF (Industry format) в составе общего узла McASP (Multichannel Audio Serial Port), который ориентирован на стандарт AES-3, он же IEC-60958. Выходной логический сигнал S/PDIF имеет уровень 1.8 В с бифазным кодированием информации. Для подключения к коаксиальному разъёму «тюльпан» или к оптическому разъёму Toslink требуется внешний узел сопряжения и защиты. Звуковой сигнал канала S/PDIF в теории может быть как стереофоническим, так и многоканальным в формате 5.1 или 7.1 по стандартам Dolby и DTS.

Канал звука (вход и выход)

McBSP — Multichannel Buffered Serial Port — универсальный полнодуплексный последовательный порт, обеспечивающий приём и передачу информации между различными устройствами на основе синхронизации кадров. Порт четырёхканальный: McBSP1 — универсальные цифровые данные, McBSP2 — выходные аудиоданные в формате I²S, McBSP3 — входные и выходные голосовые данные Bluetooth, McBSP4 — выходные данные интерфейса MIDI для музыкальных инструментов. Каждый канал содержит от четырёх до шести логических цифровых сигналов, которые выводятся на корпус AP и к которым подключаются внешние чипы, например модем Bluetooth со звуковым трактом, контроллер MIDI.

McPDM — Multichannel Pulse Density Modulation — аудиоинтерфейс фирмы Texas Instruments, предназначенный для подключения внешних аудиокодексов к AP платформы ОМАР. Интерфейс рассчитан на чип-компаньон TWL6040 фирмы Texas Instruments. Интерфейс имеет шину, состоящую из пяти информационных, тактовых и управляющих сигналов. Через них аудиокодек работает с четырьмя каналами ЦАП, двумя каналами АЦП, а также двумя вибрационными каналами для

тактильного вибромотора обратной связи. Управляется аудиокодек командами от AP по каналу I²C, содержит вход для микрофонов, выход УНЧ для стереофонических головных телефонов и выход УМЗЧ мощностью 2×1.5 Вт.

SLIMbus (два канала) — **Serial Low-power Inter-chip Media bus** — последовательная многоканальная медиашина с низким энергопотреблением. Обслуживает несколько потоков цифровых аудиоданных с разной частотой дискретизации и разрядностью. Интерфейс разработан организацией MIPI Alliance в 2003 году. В OMAP4430 имеются два независимых канала SLIMbus с сигналами *DATA* (данные) и *CLK* (тактирование с частотой до 24 МГц). Сигналы передаются блоками, где каждому устройству отводится свой временной интервал согласно принципу мультиплексирования TDM. Блоки состоят из ячеек, слотов, кадров, подкадров и суперкадров. К шинам SLIMbus могут подключаться в многоточечном режиме такие устройства, как аудиокодек, модуль Bluetooth, FM-радио и т. д.

Канал видео (вход)

MIPI CSI (два порта) — **Mobile Industry Processor Interface Camera Serial Interface** — высокоскоростной последовательный интерфейс для приёма фото- и видеоизображений от цифровых камер. В OMAP4430 имеются два порта, совместимые со спецификацией альянса MIPI: CSI-A (основной) и CSI-B (дополнительный). Из двух портов активным может быть лишь один. Интерфейс MIPI CSI является канальным окончанием блока ISS, который входит в процессорную часть AP. На физическом уровне основной порт содержит пять, а дополнительный — две пары дифференциальных сигналов *DATA* и *CLK*, а также сигналы управления.

Канал видео (выход)

MIPI DSI (два порта) — **MIPI Display Serial Interface** — высокоскоростной последовательный интерфейс для подключения TFT-дисплеев. Интерфейс универсальный, поэтому встречается как в дисплеях со встроенным контроллером и графической памятью (Command Mode), так и в дисплеях без собственной графической памяти (Video Mode). В OMAP4430 имеются два порта, совместимые со спецификацией альянса MIPI: DSI-1 (основной, SXGA@60 Гц) и DSI-2 (дополнительный, SXGA@85 Гц). Каждый из портов допускает подключение разных дисплеев. Интерфейс MIPI DSI является канальным окончанием блока Display subsystem, который входит в процессорную часть AP. Все передаваемые сигналы дифференциальные. На физическом уровне основной порт содержит четыре пары сигналов *DATA* (в транзакции 4 бита) и одну пару сигнала *CLK*. Дополнительный порт содержит две пары сигналов *DATA* (в транзакции 2 бита) и одну пару сигнала *CLK*. Максимальная физическая скорость по одной паре составляет 900 Мбит/с.

MIPI DBI — **MIPI Display Buffer Interface** — параллельный интерфейс для дисплеев со встроенным контроллером и буферной экранной памятью. В OMAP4430 применяется интерфейс MIPI DBI Type B, который совместим со спецификацией Intel 8080. Поддерживаются шины с разрядностью 8; 9; 16 бит в формате WVGA@30 Гц. Интерфейс MIPI DBI является канальным окончанием блока Display subsystem, который входит в процессорную часть AP. На физическом уровне интерфейс содержит 16 информационных сигналов *DATA* и шесть сигналов управления и тактирования.

MIPI DPI — **MIPI Display Parallel Interface** — параллельный интерфейс RGB с потенциальными КМОП-сигналами для монохромных пассивных дисплеев с разрядностью 4 и 8 бит, а также цветных активных дисплеев TFT с разрядностью 12; 16; 18; 24 бита. Интерфейс MIPI DPI является канальным окончанием блока Display subsystem, который входит в процессорную часть AP. На физическом уровне в интерфейсе используются 24 информационных сигнала *DATA* (формат RGB) и пять сигналов управления и тактирования.

TV (NTSC/PAL) — **TeleVision** — аналоговый телевизионный выход с композитным цветовым сигналом стандартов: NTSC (NTSC-J, NTSC-M) и PAL (PAL-B, PAL-D, PAL-G, PAL-H, PAL-I, PAL-M). Интерфейс TV является канальным окончанием блока Display subsystem, который входит в процессорную часть AP. Интерфейс включает в себя видеоконтроллер, видеodeкодер и 10-разрядный видеоЦАП. На физическом уровне выходной сигнал *TVout* имеет амплитуду 1.2 В на нагрузке 75 Ом и может подаваться через кабель прямо на телевизор. Также имеется сигнал *VIDEOyfb*, снимаемый непосредственно с видеоЦАП. Он может подаваться на магистральный видеоусилитель, имеющий входное сопротивление 1.5 кОм.

HDMI-1.3 — **High-Definition Multimedia Interface** — интерфейс для мультимедиа высокой чёткости. Позволяет передавать цифровой видеоконтент и многоканальные аудиосигналы с защитой от копирования HDCP (**H**igh-**b**andwidth **D**igital **C**ontent **P**rotection). Разрешение экрана до 1920×1080@60 Гц при глубине цвета 12 бит на каждый из компонентов R, G, B. Интерфейс HDMI является канальным окончанием блока Display subsystem, который входит в процессорную часть AP. В OMAP4430 обеспечивается совместимость не только с версией HDMI-1.3, но и с HDMI-1.4 в части поддержки 3D-изображений и стереоскопических форматов упаковки кадров. На физическом уровне интерфейс содержит три дифференциальные пары сигналов данных *DATA*, одну дифференциальную пару тактового сигнала *CLK*, а также четыре управляющих сигнала, включая шину I²C.

• ИНТЕРФЕЙСНАЯ ЧАСТЬ OMAP4430

Интерфейсная часть содержит две группы элементов: интерфейс внешних связей и интерфейс внешней памяти. Назначение входящих в них блоков (сверху вниз по схеме).

Интерфейс внешних связей

USB 2.0 — **Universal Serial Bus** — интерфейс «Универсальная последовательная шина» для подключения различных периферийных устройств. В OMAP4430 применяется контроллер USB OTG (**O**n-**T**he-**G**o), выполненный на базе ядра чипа MUSBMHDRC фирмы Mentor Graphics. Контроллер соответствует стандарту USB 2.0 для режимов HS (480 Мбит/с), FS (12 Мбит/с), LS (1.5 Мбит/с) и дополнению OTG-1.3 с канальным управлением питания. На физическом уровне интерфейс содержит стандартный набор сигналов для разъёмов USB, miniUSB, microUSB: *Vbus*, *D+*, *D-*, *ID*, *GND*.

ULPI — **USB Transceiver Macrocell Interface & Low Pin Interface** — параллельная 12-сигнальная шина для организации высокоскоростных IP-систем на базе USB 2.0 и подключения внешних трансиверов. Как правило, через интерфейс ULPI подключаются внешние микросхемы приёмопередатчиков, работающие в

высокоскоростном режиме HS (480 Мбит/с), например USB3320 фирмы Microchip Technology. На физическом уровне интерфейс содержит шину данных *DATA0...7*, а также сигналы управления и тактирования *CLK, DIR, NXT, STP*.

I2C (пять каналов) — **Inter-Integrated Circuit** — последовательная асимметричная шина I²C для связи между микросхемами в электронных устройствах. В OMAP4430 имеются четыре универсальных и одна специализированная шины I²C. Универсальные шины соответствуют спецификации Philips I²C v2.1 с поддержкой режимов Standard (100 кбит/с), Fast (400 кбит/с) и HS (High Speed, 3.4 Мбит/с). Все универсальные шины мультимастерные, позволяющие работать в режиме ведомого и ведущего. Специализированная шина настроена как «мастер» (ведущий) в режимах Fast и HS. Она предназначена для стыковки с внешним чипом контроллера питания PMIC, чтобы оперативно изменять напряжения, производить сброс и тактирование AP. На физическом уровне в интерфейсе I²C в каждом из пяти каналов используются двунаправленные линии связи *SDA, SCL* с уровнями 1.8 В, подключаемые к сети с топологией «общая шина».

SCCB — **Serial Camera Control Bus** — последовательная шина, аналогичная I²C, разработанная фирмой OmniVision Technologies для своих устройств семейства CameraChips — «полная видеосистема на одном кристалле» [1-7]. Скорость передачи данных до 100 кбит/с. Интерфейс трёхпроводной с уровнями 1.8 В, при этом к двум стандартным сигналам интерфейса I²C *SCL, SDA* добавляется сигнал выбора кристалла *SCCBE*.

SPI (четыре канала) — **Serial Peripheral Interface** — последовательный периферийный полнодуплексный интерфейс для простого и недорогого высокоскоростного сопряжения процессоров с внешними устройствами. В OMAP4430 используются четыре независимых канала SPI. Из них: SPI1 предназначен для подключения четырёх внешних устройств, SPI2 — двух внешних устройств, SPI3 и SPI4 — одного внешнего устройства в режиме «точка—точка». Доступны функции ведомого и ведущего. На физическом уровне используются сигналы *CLK, SIMO, SOMI, CS*, которые являются аналогами стандартных сигналов *SCK, MISO, MOSI, SS* интерфейса SPI. Максимальная тактовая частота сигнала *CLK* 48 МГц.

UART (четыре порта) — **Universal Asynchronous Receiver-Transmitter** — один из старейших последовательных интерфейсов под названием «Универсальный асинхронный приёмник-передатчик». В OMAP4430 используются четыре независимых порта UART с сигналами: *TX, RX, RTS, CTS*. Состав кадра: старт-бит, данные 5...8 бит, бит контроля чётности, стоп-бит. Максимальная скорость 3.6 Мбит/с.

IrDA-1.4 — **Infrared Data Association** — «инфракрасный» интерфейс для связи с периферийным оборудованием без кабеля при помощи ИК-излучения на длине волны 880 нм (диапазон 850...900 нм). Протокол передачи данных последовательный асинхронный. Поддерживаются скорости SIR (**S**erial **I**nfra**R**ed, до 115 200 бит/с), MIR (**M**edium **I**nfra**R**ed, до 1.152 Мбит/с), FIR (**F**ast **I**nfra**R**ed, до 4 Мбит/с). На физическом уровне используется один из портов UART, при этом в зависимости от типа ИК-устройства могут подключаться два сигнала *RTS, CTS*, три сигнала *RX, TX, RTS* или четыре сигнала *RX, TX, RTS, CTS*.

HDQ/1-Wire — **High-Speed Data Queue** — последовательный низкоскоростной интерфейс передачи данных в обе стороны по одному проводу. Совмещает в себе два интерфейса: HDQ фирм Texas Instruments, Benchmarq и 1-Wire фирмы Dallas

Semiconductor. Отличия между ними лишь в логических протоколах. Топология сети — «общая шина» с внешним нагрузочным резистором. Устройства на шине различаются между собой по уникальному цифровому 64-битному идентификатору, который считывается программно. Скорость обмена данными не более 5 кбит/с. Это ограничение интерфейса HDQ, интерфейс 1-Wire более быстрый.

*Keypad 9*9* — клавиатурный порт. Предназначен для подключения внешней клавиатуры или механической клавиатуры, состоящей максимум из 81 кнопки (девять рядов, девять колонок). Порт обслуживается внутренним контроллером клавиатуры, который работает на частоте 32 кГц и имеет «pull-up» резисторы на входных линиях. Контроллер реализует алгоритм сканирования и аппаратного декодирования нажатия кнопок, что снижает нагрузку на ЦП. Также контроллер программно устраняет «дребезг» контактов, отслеживает короткие и длинные нажатия и гарантирует однозначность определения комбинации клавиш. Кроме того, контроллер генерирует сигнал пробуждения при нажатии на любую из кнопок, когда AP находится в спящем режиме.

MIPI HSI (два порта) — **MIPI High-speed Synchronous serial Interface** — высокоскоростной многоканальный интерфейс последовательного синхронного ввода и вывода данных. Скорость интерфейса до 192 Мбит/с на передаче и до 225 Мбит/с на приёме. В OMAP4430 имеются два независимых порта MIPI HSI. На физическом уровне каждый порт содержит восемь информационных, тактовых и управляющих сигналов. Типичное применение — обмен данными с внешним сотовым 3G-модемом или с системой управления станком ЧПУ.

GPIO (192 линии) — **General-Purpose Input/Output** — общий интерфейс связи между компонентами процессорной системы через цифровые входы и выходы. Сигналы GPIO двунаправленные, с совмещением функций, могут находиться в режиме Z-входа, а также с подтягивающими резисторами. В OMAP4430 имеется шесть портов GPIO1...GPIO6 с разрядностью 32 бита каждый.

Интерфейс внешней памяти

eMMC (два канала) — **embedded Multimedia Memory Card** — интерфейс для подключения внешней «встраиваемой мультимедийной карты памяти». Чипы eMMC содержат энергонезависимую память NAND Flash большого объёма и управляющий контроллер. Подобная архитектура применяется и в картах памяти microSD, но чип eMMC распаивается на печатной плате SBC и не подлежит быстрой замене. В OMAP4430 имеются два независимых канала подключения eMMC с сигналами *DATA0...7*, *CMD*, *CLK* (максимальная частота 19.2 МГц). Напряжение питания для первого канала SDMMC1 можно выбрать 1.8 или 3 В, для второго канала SDMMC2 — только 1.8 В.

SD/MMC — **Secure Digital/MultiMedia Card** — интерфейс подключения внешних карт памяти, подобных microSD. Интерфейс SD/MMC использует первый канал SDMMC1 интерфейса eMMC и его состав сигналов. Допускается работа в четырёх- и восьмибитных режимах при частоте импульсов *CLK* до 10 МГц.

NAND Flash — **Not AND** — интерфейс подключения внешних микросхем флеш-памяти с логической организацией И-НЕ и страничной записью/чтением информации. Архитектура NAND Flash была представлена в 1989 году. Из плюсов — малое количество сигналов, простой асинхронный интерфейс, быстрая запись, низ-

кая цена, большой объём памяти. Из минусов — медленное чтение и отсутствие произвольного доступа к ячейкам памяти. В OMAP4430 допускается подключение до восьми чипов NAND Flash с разрядностью 8 или 16 бит, с внутренним исправлением ошибок или без него. Интерфейс связи с AP содержит объединённую шину адреса и данных, а также управляющие и тактовые сигналы. На физическом уровне сигналы совмещаются с выводами каналов SDMMC1, SDMMC2, используя 15 или 23 линии связи с уровнями 1.8 В. Область применения чипов NAND Flash — хранение и запуск пользовательских программ.

NOR Flash — **Not OR** — интерфейс подключения внешних микросхем флеш-памяти с логической организацией ИЛИ-НЕ и произвольным доступом к ячейкам данных. Архитектура NOR Flash была представлена в 1988 году. Её особенности: надёжность хранения информации, синхронный протокол работы, высокая скорость чтения, но медленная запись и достаточно высокая цена. В OMAP4430 допускается подключение до восьми 16-разрядных чипов NOR Flash объёмом 1 Гб. На физическом уровне используются линии связи с уровнями 1.8 В, которые совмещаются с выводами каналов SDMMC1, SDMMC2. Область применения чипов NOR Flash — долговременное хранение объёмов информации, где требуется быстрое чтение, но не нужна частая запись.

OneNAND Flash — **One Not AND** — оригинальная архитектура, разработанная фирмой Samsung в 2004 году и сочетающая преимущества NAND и NOR Flash. Её особенности: высокое быстродействие, большая ёмкость, низкое энергопотребление, синхронный протокол работы. В OMAP4430 допускается применение до восьми 16-разрядных чипов OneNAND Flash. На физическом уровне используется 24 линии связи с уровнями 1.8 В, которые совмещаются с выводами каналов SDMMC1, SDMMC2.

pSRAM — **pseudo-Static Random Access Memory** — псевдостатическая оперативная память. Представляет собой маломощное запоминающее устройство, основанное на ячейках динамической памяти DRAM с внутренними функциями обновления и управления адресами, а также с возможностью синхронного и асинхронного доступов к данным аналогично NOR Flash. В OMAP4430 допускается применение до восьми 16-разрядных чипов pSRAM объёмом памяти 1 Гб. На физическом уровне используется 33 линии связи, совмещённые с выводами каналов SDMMC1, SDMMC2.

LPDDR2 (PoP) — **Low Power Double Data Rate 2 (Package-on-Package)** — разновидность синхронной динамической памяти SDRAM (**Synchronous Dynamic Random Access Memory**) с произвольным доступом к ячейкам памяти и удвоенной скоростью транзакций. Память второго поколения, скорость передачи данных до 1066 МТ/с (миллионов транзакций в секунду). По сравнению с DDR2 отличается пониженным энергопотреблением. В OMAP4430 поддерживаются два канала LPDDR2 разрядностью 32 бита каждый в расчёте на применение двухканальной микросхемы SDRAM из серии «Mobile RAM PoP», например EDB8164B3PF фирмы Micron. Эта микросхема имеет ёмкость 8 Гбит и работает на тактовой частоте до 533 МГц. У неё такие же габариты 12×12 мм, как у OMAP4430, и 216 шариковых выводов. Запаивается она сверху корпуса AP в виде конструкции «сэндвич», что соответствует технологии PoP.