

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	11
Глава 1. Процессорное ядро ARM7	13
Основные положения	13
Конвейер	13
Регистры	14
Регистр текущего состояния программы	16
Режимы обработки исключительных ситуаций	18
Набор команд ARM7	21
Команды ветвления	23
Команды обработки данных	24
Команда обмена	26
Изменение регистров состояния	27
Программное прерывание	28
Модуль MAC	28
Набор команд THUMB	29
Резюме	32
Глава 2. Разработка программного обеспечения	33
Основные положения	33
Какой из компиляторов?	33
ИСП μ VISION	35
Учебное пособие	35
Стартовый код	36
Взаимодействие кода ARM и THUMB	38
Библиотека STDIO	41
Организация доступа к периферийным устройствам	42
Подпрограммы обработки прерываний	42
Программное прерывание	44
Размещение кода в ОЗУ	45
Встраиваемые функции	46

Поддержка операционных систем	47
Размещение объектов по фиксированным адресам	47
Встроенный ассемблер	47
Аппаратные средства отладки.	47
Важное замечание!	49
Еще более важное замечание!	49
Резюме	50
Глава 3. Системные периферийные устройства	51
Основные положения	51
Внутренние шины	51
Организация памяти	52
Программирование регистров	54
Модуль ускорения работы памяти.	55
Пример конфигурирования модуля MAM	58
Программирование FLASH-памяти	59
Управление картой распределения памяти	60
Загрузчик	60
Внутрисхемное программирование (ISP)	62
Внутрипрограммное программирование (IAP)	63
Интерфейс внешней шины.	64
Интерфейс внешней памяти	65
Использование интерфейса внешней шины.	68
Загрузка из ПЗУ	70
Схема ФАПЧ	71
Делитель шины VPB.	73
Управление электропитанием	75
Система прерываний LPC2000.	77
Блок управления выводами	77
Выводы внешних прерываний.	78
Структура прерываний	78
Прерывание FIQ	79
Выход из прерывания FIQ	80
Векторные прерывания IRQ	81
Выход из прерывания IRQ	84
Невекторные прерывания	85
Выход из не векторного прерывания IRQ	86
Вложенные прерывания	88
Резюме	90
Глава 4. Периферийные устройства общего назначения	91
Основные положения	91
Порты ввода/вывода общего назначения.	91
Таймеры общего назначения	92
Модуль ШИМ	96

Часы реального времени	100
Сторожевой таймер	104
Универсальный асинхронный передатчик	105
Интерфейс I2C	111
Интерфейс SPI	117
Аналого-цифровой преобразователь	119
Цифро-аналоговый преобразователь	123
Контроллер интерфейса CAN	123
Семиуровневая модель ISO	124
Структура узла сети CAN	125
Объекты сообщений CAN	126
Арбитраж на шине CAN	128
Тактовая синхронизация	129
Передача сообщений CAN	131
Ограничение распространения ошибок	133
Прием сообщений CAN	138
Фильтрация сообщений	139
Полноскоростной интерфейс USB 2.0	143
Введение в USB	143
Физическая организация шины USB	144
Логическая организация шины USB	146
Скорость передачи данных	147
Каналы шины USB	147
Распределение полосы пропускания шины	150
Транзакции на шине USB	150
Ограничение распространения ошибок	152
Конфигурация устройства	152
Дескриптор устройства	153
Дескриптор конфигурации	154
Дескриптор интерфейса	155
Дескриптор конечной точки	155
Нумерация	156
Резюме	170
Глава 5. Учебное пособие по средствам разработки компании Keil	171
Установка	171
Использование ИСП μ VISION компании Keil	172
Упражнение 1. Использование пакета программ компании Keil	173
Использование программы отладки	181
Использование аппаратного JTAG-отладчика ULINK	185
Установка отладчика ULINK	185
Упражнение 2. Стартовый код	188
Упражнение 3. Использование кода THUMB	189
Упражнение 4. Использование библиотек STDIO	191

Упражнение 5. Простое прерывание	192
Упражнение 6. Программное прерывание	194
Упражнение 7. Модуль МАРМ	196
Упражнение 8. Внутрипрограммное программирование	198
Упражнение 9. Интерфейс внешней шины	199
Упражнение 10. Схема ФАПЧ	203
Упражнение 11. Быстрое прерывание	204
Упражнение 12. Векторное прерывание	204
Упражнение 13. Невекторное прерывание	206
Упражнение 14. Вложенные прерывания	207
Упражнение 15. Порты ввода/вывода общего назначения	208
Упражнение 16. Функция захвата (capture)	208
Упражнение 17. Функция совпадения (match)	209
Упражнение 18. Генерация симметричного ШИМ-сигнала	212
Упражнение 19. Часы реального времени	214
Упражнение 20. UART	215
Упражнение 21. Интерфейс I2C	215
Упражнение 22. Интерфейс SPI	217
Упражнение 23. Аналого-цифровой преобразователь	217
Упражнение 24. Цифро-аналоговый преобразователь	218
Упражнение 25. Передача данных по интерфейсу CAN	218
Упражнение 26. Прием данных по интерфейсу CAN	219
Глава 6. Учебное пособие по средствам разработки GNU	221
Основные положения	221
Стартовый код GCC	221
Взаимодействие кода ARM/THUMB	221
Организация доступа к периферийным устройствам	222
Подпрограммы обработки прерываний	222
Программное прерывание	222
Встраиваемые функции	223
Упражнение 1. Использование инструментальных средств компании Keil совместно с компилятором GNU	223
Упражнение 2. Стартовый код	229
Упражнение 3. Использование кода THUMB	230
Упражнение 4. Использование библиотек GNU	233
Упражнение 5. Простое прерывание	233
Упражнение 6. Программное прерывание	235
Приложение	237
Список литературы	237
Ссылки	237
Инструментальные средства и ПО	237
Оценочные платы и модули	237
Материалы, размещенные на компакт-диске	238

Введение

Эта книга представляет собой практическое руководство для тех, кто собирается использовать в своих новых разработках тот или иной микроконтроллер семейства LPC2000 компании Philips. Данная книга не является ни справочником, ни учебным пособием. Предполагается, что читатель имеет некоторый опыт в области программирования микроконтроллеров для встраиваемых систем и знаком с языком программирования Си. Основной объем технической информации содержится в четырех первых главах книги, поэтому, если вы совершенно не знакомы с семейством LPC2000 и, в частности, с процессорным ядром ARM7, вам необходимо внимательно прочитать эти главы.

В первой главе рассматриваются основные характеристики процессорного ядра (ЦПУ) ARM7. После прочтения этой главы вы будете знать достаточно, чтобы начать писать программы для любых устройств, построенных на базе ядра ARM7. Если же вы хотите расширить свои знания, к вашим услугам имеется несколько прекрасных книг, описывающих эту архитектуру, часть из которых указана в списке литературы. Во второй главе рассказывается о том, как следует писать программы на языке Си для процессора ARM7. По существу, в этой главе описываются специфические расширения стандарта ANSI C, требуемые для программирования встраиваемых систем. Все примеры, встречающиеся в книге, были написаны с использованием коммерческого компилятора, однако в настоящее время на платформу ARM перенесен и бесплатный пакет программ GCC.

В главе 6 подробно описаны особенности компилятора GCC, специфические для ARM. После прочтения первых двух глав книги вы должны хорошо разбираться в процессоре и средствах разработки для него. Третья глава посвящена системной периферии семейства LPC2000. В ней рассказывается о системной архитектуре микроконтроллеров семейства и рассматривается вопрос конфигурирования микросхем для достижения наибольшей производительности. В четвертой главе мы познакомимся со встроенными периферийными устройствами этих микроконтроллеров и узнаем, как их необходимо конфигурировать при использовании в своих программах.

На протяжении всех четырех глав вам будут встречаться различные упражнения. Все эти упражнения подробно рассматриваются в пятой главе, посвященной практическим занятиям. Упражнения можно выполнить, используя ознакомительные версии компилятора и симулятора, имеющиеся на компакт-диске, который прилагается к книге. В продаже также имеется недорогой стартовый набор разработчика (starter kit), используя который вы можете загрузить учебную программу в реальный микроконтроллер и удостовериться, что она действительно работает. Я искренне надеюсь, что, читая эту книгу и выполняя упражнения, вы быстро освоите микроконтроллеры семейства LPC2000.

ПРОЦЕССОРНОЕ ЯДРО ARM7

Основные положения

Все микроконтроллеры семейства LPC2000 построены на основе ЦПУ ARM7. Вообще говоря, чтобы использовать эти микроконтроллеры, вам совершенно не нужно быть экспертом в области программирования процессора ARM7, поскольку заботу о большинстве сложных моментов берет на себя компилятор языка Си. Тем не менее, чтобы разработать надежное устройство, вы должны иметь хотя бы общее представление о том, как работает ЦПУ и какие у него имеются особенности.

В этой главе мы рассмотрим основные характеристики ядра ARM7 вместе с его моделью программирования, а также обсудим набор команд, используемый этим процессором. В результате вы получите всю необходимую информацию о процессоре, являющемся «сердцем» семейства LPC2000. Для более углубленного изучения процессоров ARM рекомендую обратиться к книгам, указанным в списке литературы.

Ключевой принцип, лежащий в основе процессора ARM, — простота. Ядро ARM7 является RISC-машинной, предполагающей использование небольшого числа команд и соответственно состоящей из относительно небольшого количества логических элементов. Благодаря этому процессор ARM7 идеально подходит для использования во встраиваемых системах. Он имеет высокую производительность, низкое энергопотребление и занимает небольшую часть общей площади кристалла.

Конвейер

Основной элемент ЦПУ ARM7 — конвейер команд, который используется для обработки команд, считанных из памяти программ. Конкретно, в ядре ARM7 реализован трехступенчатый конвейер (**Рис. 1.1**).

Трехступенчатый конвейер является самой простой разновидностью конвейеров и не подвержен возникновению различных опасных ситуаций, таких как «чтение раньше записи», которые встречаются в конвейерах с большим числом ступеней. Конвейер имеет три аппаратно-независимые ступени, благодаря которым одновременно с выполнением одной команды осуществляется декодирование второй и выборка третьей. Он настолько эффективно ускоряет прохождение



Рис. 1.1. Работа трехступенчатого конвейера

команд через ЦПУ, что большинство команд ARM может выполняться за один такт. Конвейер наиболее эффективен при выполнении линейного кода. При обнаружении перехода конвейер сбрасывается, и для возобновления выполнения программы с максимальной скоростью он должен сначала заполниться. Позже мы с вами увидим, что набор команд процессора ARM имеет несколько интересных особенностей, позволяющих исключить из кода короткие переходы для улучшения прохождения кода по конвейеру. Поскольку конвейер является составной частью ЦПУ, он полностью скрыт от программиста. Тем не менее, важно помнить, что значение счетчика команд (Program Counter — PC) на 8 байт превышает значение адреса текущей выполняемой команды. В связи с этим необходимо аккуратно подходить к вычислению смещений в случае относительной адресации с использованием счетчика команд.

Например, команда:

```
0x40000    LDR    PC, [PC, #4]
```

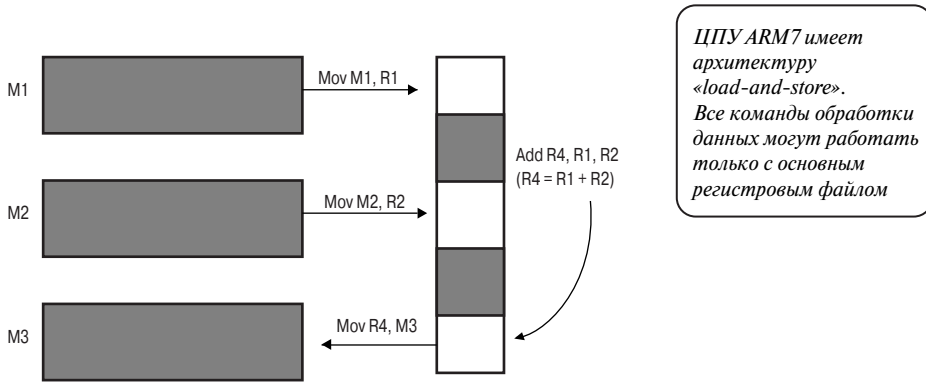
загрузит в счетчик команд PC содержимое, находящееся по адресу PC + 4. Поскольку PC опережает текущую команду на 8 байт, в него будет загружено содержимое по адресу 0x400C, а не 0x4004.

Регистры

Процессор ARM7 имеет архитектуру «load-and-store» (загрузка — сохранение), поэтому для выполнения любой обработки данных необходимо сначала перенести эти данные из памяти в определенные регистры, выполнить команду обработки данных и затем записать полученные значения обратно в память (**Рис. 1.2**).

Основной регистровый файл состоит из 16 пользовательских регистров R0...R15 (**Рис. 1.3**). Каждый из этих регистров является 32-битным¹⁾. Регистры R0...R12 предназначены исключительно для нужд пользователя и не выполняют никаких других функций, в то время как регистры R13...R15 имеют дополнитель-

¹⁾ В отечественной литературе принято пользоваться понятиями «разряд», «разрядный». В данном издании мы будем придерживаться зарубежной терминологии («бит», «битный»), что более соответствует современной тенденции в цифровой технике. — *Прим. редактора.*



ЦПУ ARM7 имеет архитектуру «load-and-store». Все команды обработки данных могут работать только с основным регистровым файлом

Рис. 1.2. Обработка данных

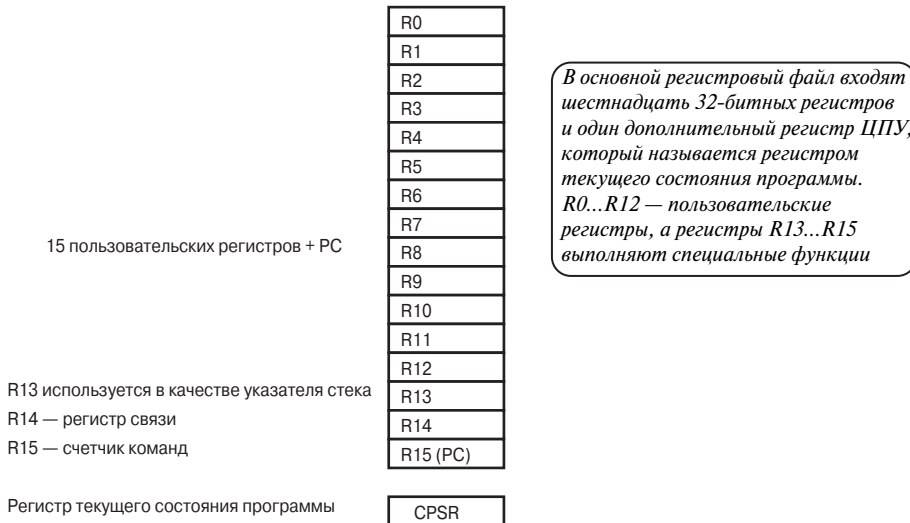


Рис. 1.3. Структура основного регистрового файла

ные функции. Регистр R13 используется в качестве указателя стека (Stack Pointer — SP). Регистр R14 называется регистром связи (Link Register — LR). При вызове подпрограммы адрес возврата автоматически запоминается в регистре связи, откуда затем считывается при возврате. Такое решение позволяет быстро переходить к «концевым» функциям (функции, которые не вызывают других функций) и возвращаться из них. Если же функция входит в состав «ветви», т.е. вызывает другие функции, содержимое регистра связи необходимо сохранять в стеке (R13). Наконец, регистр R15 выполняет функции счетчика команд (PC). Что интересно, многие команды могут работать с регистрами R13...R15, как с обычными пользовательскими регистрами.

Регистр текущего состояния программы

Наряду с банком регистров в ЦПУ имеется дополнительный 32-битный регистр, который называется регистром текущего состояния программы (Current Program Status Register — CPSR). Регистр CPSR содержит набор флагов, которые управляют функционированием ЦПУ ARM7 и отображают его состояние (Рис. 1.4).

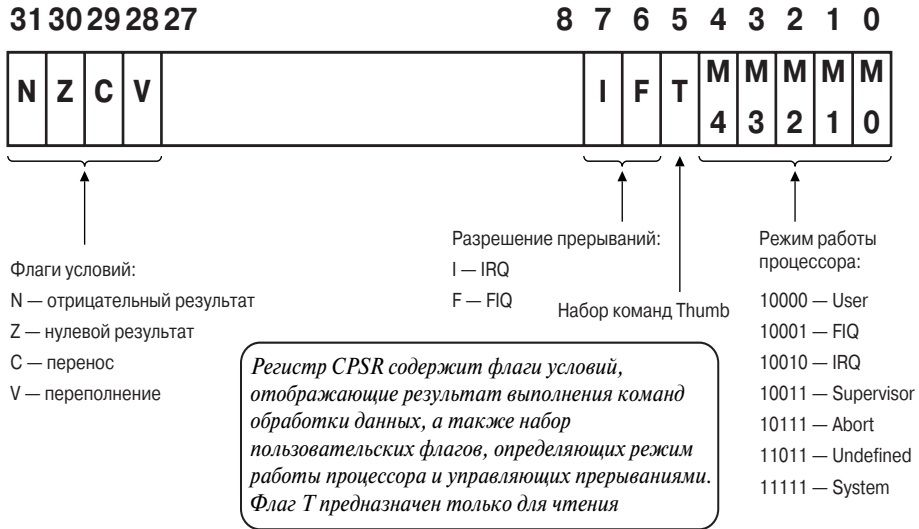


Рис. 1.4. Регистр текущего состояния программы

В старших четырех битах регистра CPSR хранятся флаги условий, значения которых определяются процессором. Эти флаги отражают результат выполнения очередной команды обработки данных. Благодаря им вы можете узнать, не было ли получено в результате выполнения команды отрицательное или нулевое значение, а также не произошел ли перенос или переполнение. Младшие восемь битов регистра CPSR содержат флаги, значения которых прикладная программа может изменять. Биты 7 и 8 являются флагами I и F соответственно. Эти флаги используются для разрешения и запрещения двух линий прерываний, являющихся внешними по отношению к ЦПУ ARM7. Как мы с вами увидим позже, все периферийные модули микроконтроллеров LPC2000 подключены к этим двум линиям прерываний. При работе с данными битами нужно соблюдать осторожность, поскольку для запрещения любого из источников прерываний в соответствующий бит необходимо записать 1, а не 0, как можно было бы предположить. Пятый бит регистра является флагом THUMB.

ЦПУ ARM7 поддерживает два набора команд — 32-битный набор команд ARM и 16-битный набор команд THUMB. Соответственно флаг T показывает, какой из наборов команд используется. Учтите, что программа не должна пытаться напрямую устанавливать или сбрасывать этот флаг для переключения между

наборами команд. Корректный механизм смены текущего набора команд мы рассмотрим чуть позже. Последние пять битов регистра CPSR являются флагами режима. В общей сложности процессор ARM7 поддерживает 7 режимов работы. Прикладные программы, как правило, выполняются в режиме User. В этом режиме программа может обращаться к регистрам R0...R15 и CPSR. Однако при возникновении исключительных ситуаций (таких как прерывание, ошибка памяти или выполнение команды генерации программного прерывания) режим работы процессора изменяется. При этом регистры R0...R12 и R15 остаются теми же самыми, а регистры R13 (LR) и R14 (SP) заменяются новой парой регистров, уникальной для каждого режима. Таким образом, каждый режим имеет собственный регистр связи и указатель стека. Более того, в режиме быстрых прерываний (FIQ) дублируются и регистры R7...R12. Это позволит вам сразу же приступить к обработке прерывания FIQ, не тратя время на сохранение регистров в стеке.

В каждом из режимов, за исключением режима User, имеется дополнительный регистр, называемый регистром сохраненного состояния программы (Saved Program Status Register — SPSR). Если в момент возникновения исключительной ситуации программа находилась в режиме User, то происходит смена режима, и текущее содержимое регистра CPSR сохраняется в регистре SPSR. После обработки исключительной ситуации (при возврате из обработчика) содержимое регистра CPSR восстанавливается из SPSR, обеспечивая возобновление выполнения прикладной программы. Режимы работы процессора показаны на **Рис. 1.5**.

ЦПУ ARM7 имеет 6 различных рабочих режимов, которые используются для обработки исключительных ситуаций. Затененные регистры представляют собой дублирующие регистры, которые «включаются» при изменении режима работы. Регистр SPSR используется для сохранения содержимого регистра CPSR при переключении режимов

System & User	FIQ	Supervisor	Abort	IRQ	Undefined
R0	R0	R0	R0	R0	R0
R1	R1	R1	R1	R1	R1
R2	R2	R2	R2	R2	R2
R3	R3	R3	R3	R3	R3
R4	R4	R4	R4	R4	R4
R5	R5	R5	R5	R5	R5
R6	R6	R6	R6	R6	R6
R7	R7_fiq	R7	R7	R7	R7
R8	R8_fiq	R8	R8	R8	R8
R9	R9_fiq	R9	R9	R9	R9
R10	R10_fiq	R10	R10	R10	R10
R11	R11_fiq	R11	R11	R11	R11
R12	R12_fiq	R12	R12	R12	R12
R13	R13_fiq	R13_svc	R13_abt	R13_irq	R13_und
R14	R14_fiq	R14_svc	R14_abt	R14_irq	R14_und
R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)	R15 (PC)
CPSR	CPSR SPSR_fiq	CPSR SPSR_svc	CPSR SPSR_abt	CPSR SPSR_irq	CPSR SPSR_und

Рис. 1.5. Режимы работы процессора

Режимы обработки исключительных ситуаций

При возникновении исключительной ситуации изменяется режим работы ЦПУ, и в РС загружается адрес соответствующего вектора прерывания (Табл. 1.1). Таблица векторов начинается с нулевого адреса, первым в таблице расположен вектор сброса, а за ним остальные векторы (по 4 байта на каждый).

Таблица 1.1. Адреса векторов прерываний

Исключительная ситуация	Режим	Адрес вектора
Reset (сброс)	Supervisor	0x00000000
Undefined instruction (неопределенная команда)	Undefined	0x00000004
SWI (программное прерывание)	Supervisor	0x00000008
Prefetch Abort (ошибка обращения к памяти при выборке команды)	Abort	0x0000000C
Data Abort (ошибка обращения к памяти при доступе к данным)	Abort	0x00000010
IRQ (прерывание)	IRQ	0x00000018
FIQ (быстрое прерывание)	FIQ	0x0000001C

Каждому режиму работы соответствует свой вектор прерывания. При смене процессором режима производится переход по этому вектору. Обратите внимание! Вектор по адресу 0x00000014 отсутствует!

Замечание. В таблице векторов имеется «дырка», поскольку вектор с адресом 0x00000014 отсутствует. Этот адрес использовался в ранних версиях процессоров ARM, а в процессоре ARM7 он сохранен, чтобы обеспечить программную совместимость между различными архитектурами ARM. Однако, как мы увидим позже, в микроконтроллерах семейства LPC2000 эти четыре байта играют очень важную роль.

При одновременном возникновении нескольких исключительных ситуаций используется метод приоритетов. Приоритеты прерываний приведены в Табл. 1.2.

Таблица 1.2. Приоритеты прерываний

Приоритет	Исключительная ситуация
Высший 1	Reset
2	Data Abort
3	FIQ
4	IRQ
5	Prefetch Abort
Низший 6	Undefined instruction SWI

Каждый источник исключительной ситуации имеет фиксированный приоритет. Встроенные периферийные устройства обслуживаются прерываниями FIQ и IRQ. Приоритеты прерываний от периферийных устройств можно назначать внутри этих групп

Когда возникает исключительная ситуация, например прерывание IRQ, процессор выполняет следующие действия (**Рис. 1.6**). Во-первых, адрес следующей выполняемой команды ($PC + 4$) сохраняется в регистре связи. Затем регистр CPSR копируется в регистр SPSR конечного режима (в нашем случае SPSR_irq). После этого в PC заносится адрес вектора прерывания режима исключительной ситуации. Для режима IRQ этот адрес — $0x00000018$. В то же время режим работы процессора меняется на IRQ, в результате чего регистры R13 и R14 заменяются соответствующими регистрами этого режима. При входе в режим IRQ устанавливается флаг I регистра CPSR, что приводит к отключению линии IRQ. Если требуется использовать вложенные прерывания, то вы должны вручную разрешить прерывание IRQ в программе и занести содержимое регистра связи в стек, чтобы сохранить исходный адрес возврата. С вектора прерывания программа перейдет к выполнению подпрограммы обработки прерываний. Первое, что необходимо сделать в данной подпрограмме, — сохранить в стеке IRQ все регистры из диапазона R0...R12, которые будут в ней использоваться. Затем можно приступить собственно к обработке исключительной ситуации.

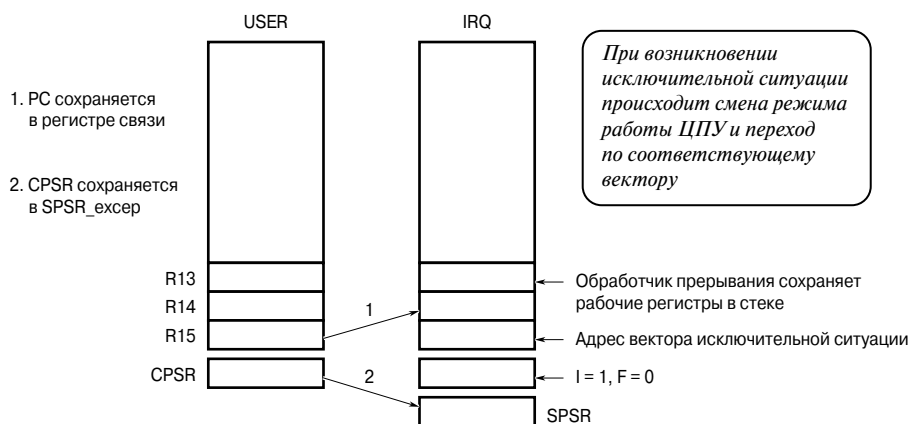


Рис. 1.6. Обработка исключительной ситуации

После завершения обработки исключительной ситуации необходимо вернуться в режим User и продолжить выполнение программы с прерванного места. Однако в наборе команд ARM отсутствуют команды типа «возврат» или «возврат из подпрограммы», поэтому манипуляции со счетчиком команд PC необходимо осуществлять, используя обычные команды. Ситуация усложняется тем, что существует несколько различных вариантов возврата.

Для начала взглянем на команду SWI. При выполнении этой команды адрес следующей выполняемой команды сохраняется в регистре связи, после чего производится обработка исключительной ситуации. Все, что нам нужно сделать для возврата из исключительной ситуации, — это загрузить содержимое регистра связи обратно в PC, и программа продолжит свое выполнение. Однако, чтобы ЦПУ при этом переключился обратно в режим User, необходимо использовать специальную команду пересылки MOVS (более подробно мы рассмотрим ее чуть позже). Таким образом, команда возврата из программного прерывания будет следующей:

MOVS R15,R14 ; Скопировать регистр связи в PC и переключить режимы

А при возникновении исключительной ситуации по прерываниям FIQ и IRQ текущая выполняемая команда сбрасывается и выполняется переход к обработчику исключительной ситуации. При возврате из исключительной ситуации в регистре связи находится адрес отброшенной команды плюс 4. Чтобы возобновить выполнение программы с нужного места, мы должны уменьшить значение, хранящееся в регистре связи, на 4. В данном случае для уменьшения содержимого регистра связи и сохранения результата в PC мы используем специальную команду вычитания, восстанавливающую также и режим работы ЦПУ. Таким образом, команда возврата из режимов FIQ, IRQ и Abort выглядит следующим образом:

```
SUBS      R15,R14,#4
```

В случае, если произошла ошибка обращения к памяти, исключительная ситуация возникнет через одну команду после той, выполнение которой явилось ее причиной. В идеале, в этом случае мы должны перейти к подпрограмме обработки прерывания Data Abort, выяснить и устранить причину затруднений и снова попытаться выполнить команду, которая привела к возникновению исключительной ситуации. Соответственно, мы должны «отмотать» PC назад на две команды — отброшенную и вызвавшую возникновение исключительной ситуации. Другими словами, нам нужно вычесть из регистра связи число восемь и сохранить результат в PC. Таким образом, команда возврата из прерывания Data Abort имеет вид:

```
SUBS      R15,R14,#8
```

При выполнении команды возврата модифицированное содержимое регистра связи загружается в счетчик команд, ЦПУ переключается обратно в режим User, а содержимое регистра SPSR переписывается обратно в CPSR. В случае возникновения исключительных ситуаций FIQ или IRQ дополнительно разрешаются соответствующие прерывания. В результате всех этих действий процессор выходит из привилегированного режима и возвращается к выполнению пользовательской программы (Рис. 1.7).

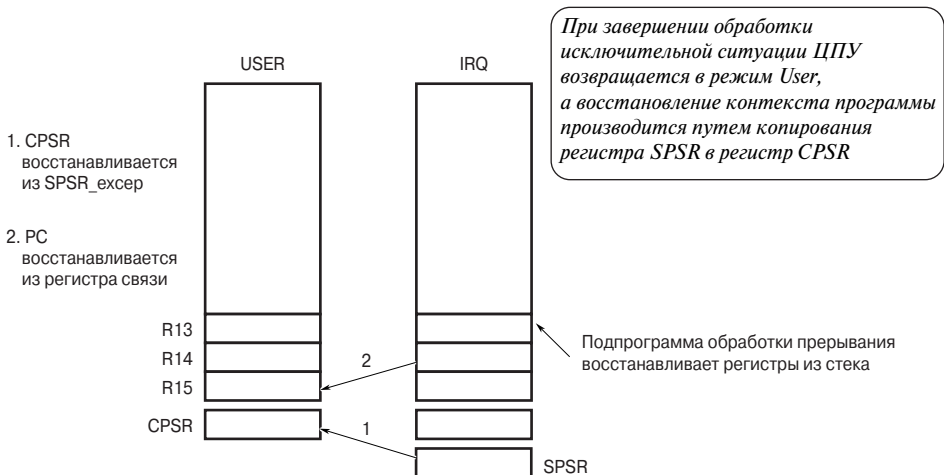
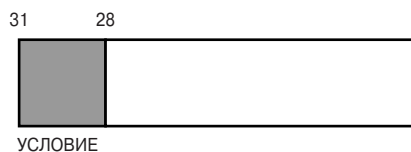


Рис. 1.7. Завершение обработки исключительной ситуации



Каждая команда ARM (32-битная) является условно выполняемой. Между 4 старшими битами кода команды и флагами условий регистра CPSR производится операция «Логическое И». Если значения не совпадают, выполняется команда NOP

Рис. 1.9. Расположение битов сравнения в команде ARM

Таким образом, можно выполнить какую-либо команду обработки данных, изменяющую флаги условий в регистре CPSR. Затем, в зависимости от результата, следующая команда может быть выполнена, а может и нет. К базовым мнемоническим обозначениям команд ассемблера, таким как MOV или ADD, можно добавить любой из шестнадцати префиксов, определяющих тестируемые состояния флагов условий (Табл. 1.3).

Таблица 1.3. Префиксы команд

Префикс	Флаги	Значение
EQ	Z установлен	Равно
NE	Z сброшен	Не равно
CS	C установлен	Выше или равно (беззнаковое)
CC	C сброшен	Ниже (беззнаковое)
MI	N установлен	Отрицательный результат
PL	N сброшен	Положительный результат или 0
VS	V установлен	Переполнение
VC	V сброшен	Нет переполнения
HI	C установлен, Z сброшен	Выше (беззнаковое)
LS	C сброшен, Z установлен	Ниже или равно (беззнаковое)
GE	N равен V	Больше или равно (знаковое)
LT	N не равен V	Меньше (знаковое)
GT	Z сброшен И (N равен V)	Больше (знаковое)
LE	Z установлен ИЛИ (N не равен V)	Меньше или равно (знаковое)
AL	(игнорируются)	Безусловное выполнение

К обозначению любой команды ARM (32-битной) можно добавить один из 16 префиксов, определяющих тестируемые флаги условий. Соответственно существует 16 вариантов каждой команды

К примеру:

```
EQMOV R1, #0x00800000
```

означает, что загрузка числа 0x00800000 в регистр R1 будет произведена только в том случае, если результат выполнения последней команды обработки данных был «равно» и соответственно установлен флаг Z регистра CPSR. Целью такого условного выполнения команд является обеспечение непрерывности потока команд через конвейер, т.к. при каждом выполнении команд перехода конвейер

сбрасывается, и на его повторное заполнение требуется время, что резко снижает общую производительность. На практике существует некоторый порог, при котором принудительное «проталкивание» команд NOP через конвейер оказывается эффективнее выполнения традиционных команд условного перехода и связанного с этим повторным заполнением буфера. Этот порог равен трем командам, поэтому короткий переход, такой как:

```
if(x < 100)
{
    x++;
}
```

при использовании условно выполняемых команд ARM будет реализован более эффективно.

Все множество команд ARM можно разбить на 6 основных групп: команды ветвления, команды обработки данных, команды передачи данных, команды передачи блоков данных, команды умножения и команда программного прерывания.

Команды ветвления

Базовая команда перехода (B), как следует из ее названия, позволяет выполнять переход в диапазоне до 32 Мбайт как вперед, так и назад. Модифицированная версия команды, команда перехода с сохранением адреса (BL), выполняет ту же операцию, однако при этом сохраняет в регистре связи текущее значение PC, увеличенное на четыре (Рис. 1.10).

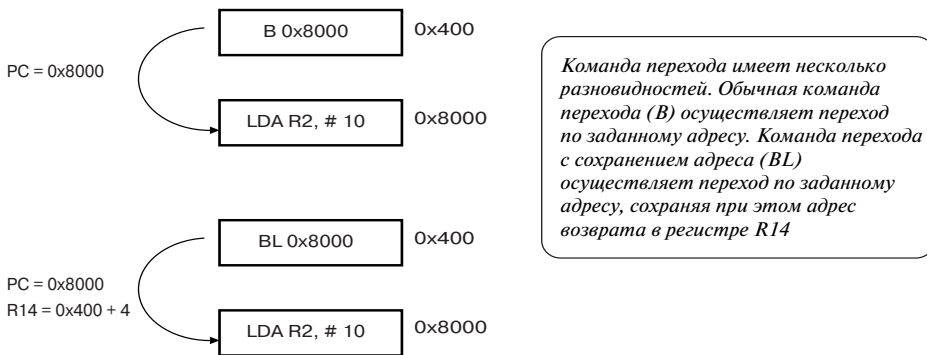


Рис. 1.10. Команды перехода B и BL

Таким образом, команда перехода с сохранением адреса используется в качестве команды вызова подпрограмм, сохраняющей адрес возврата в регистре связи. Для возврата из подпрограмм можно использовать команду обычного перехода, выполняющую переход по адресу, находящемуся в регистре связи. Используя флаги условий, мы можем выполнять условные переходы и условные вызовы подпрограмм. Существует еще две разновидности команды перехода: «переход со сменой состояния» (BX) и «переход со сменой состояния и сохранением адреса» (BLX). Эти команды выполняют те же операции, что и предыдущие команды, но

при этом еще и выполняют переключение с набора команд ARM на THUMB и обратно (Рис. 1.11).

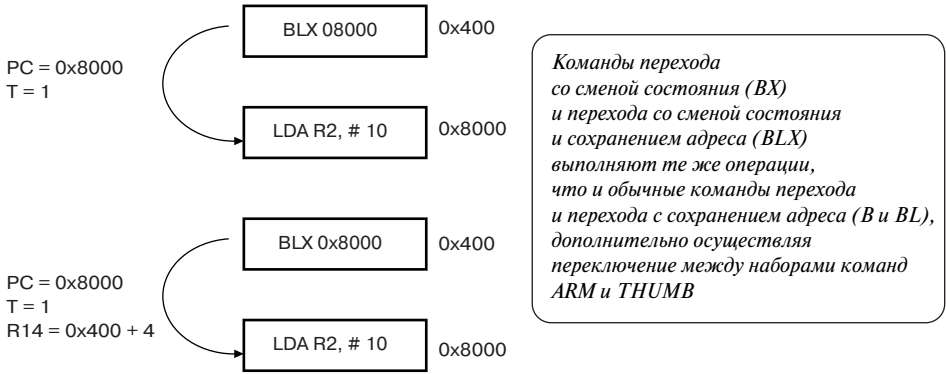


Рис. 1.11. Команды перехода BX и BLX

Это единственный способ, который вы должны использовать для изменения используемого набора команд, т.к. непосредственные манипуляции с флагом T регистра CPSR могут привести к непредсказуемым результатам.

Команды обработки данных

Обобщенный формат всех команд обработки данных приведен на Рис. 1.12. В каждой команде имеется регистр результата и два операнда. Первый операнд обязательно должен быть регистром, тогда как второй может быть регистром, и константой.

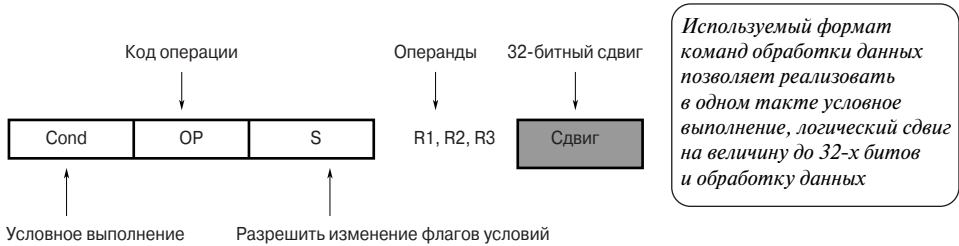


Рис. 1.12. Формат команд обработки данных

Помимо всего прочего, в ЦПУ ARM7 имеется многорегистровое устройство циклического сдвига (barrel shifter), позволяющее при выполнении команды сдвигать значение 2-го операнда на величину до 32-х битов. Бит S используется для управления флагами условий. Если этот бит установлен, флаги условий изменяются в соответствии с результатом выполнения команды. Если этот бит сброшен, состояние флагов условий не изменяется. Однако если при установленном бите S в качестве регистра результата указан счетчик команд (R15), производится копирование содержимого регистра SPSR текущего режима в регистр CPSR. Эта возможность используется для восстановления PC и переключения в исходный

режим в конце обработки исключительных ситуаций. Не пытайтесь выполнить такую команду в режиме User, поскольку в этом режиме отсутствует регистр SPSR и соответственно результат выполнения этой команды невозможно предсказать.

Мнемокод	Описание команды
AND	Логическое побитовое «И»
EOR	Логическое побитовое «исключающее ИЛИ»
SUB	Вычитание
RSB	Обратное вычитание
ADD	Сложение
ADC	Сложение с учетом переноса
SBC	Вычитание с заемом
RSC	Обратное вычитание с заемом
TST	Проверка битов
TEQ	Побитовое сравнение
CMN	Сравнение
CMN	Сравнение с отрицанием
ORR	Логическое побитовое «ИЛИ»
MOV	Пересылка
BIC	Сброс битов (маскирование)
MVN	Пересылка с инверсией

Эти особенности предоставляют нам богатый набор команд обработки данных, который, с одной стороны, позволяет создавать очень эффективные программы, а с другой — является источником ночных кошмаров для разработчиков компиляторов. Вот пример использования типовой команды ARM.

Результатом компиляции выражения

```
if (Z == 1)
R1 = R2 + (R3 × 4);
```

может быть следующая команда:

```
EQADDS    R1, R2, R3, LSL #2
```

Копирование регистров

Следующую группу составляют команды передачи данных. ЦПУ ARM7 поддерживает команды загрузки/сохранения, позволяющие пересылать знаковые и беззнаковые числа разного размера (слово, полуслово, байт) в/из заданного регистра.

Мнемокод	Описание команды
LDR	Загрузить слово
LDRH	Загрузить полуслово
LDRSH	Загрузить полуслово со знаком
LDRB	Загрузить байт
LDRSB	Загрузить байт со знаком
STR	Сохранить слово
STRH	Сохранить полуслово
STRSH	Сохранить полуслово со знаком
STRB	Сохранить байт
STRSB	Сохранить байт со знаком

Поскольку набор команд полностью ортогонален, можно загружать 32-битное значение непосредственно в РС, осуществляя, таким образом, переход в пределах всего адресного пространства процессора. Если конечный адрес лежит вне диапазона команды перехода, можно просто загрузить сохраненную константу в счетчик команд.

Групповое копирование регистров

Помимо команд загрузки/сохранения содержимого отдельных регистров, в наборе команд ARM имеются команды для загрузки (LDM) и сохранения (STM) групп регистров (Рис. 1.13). Таким образом, с помощью одной команды можно скопировать в память весь блок регистров или его часть, а с помощью другой — восстановить его содержимое.

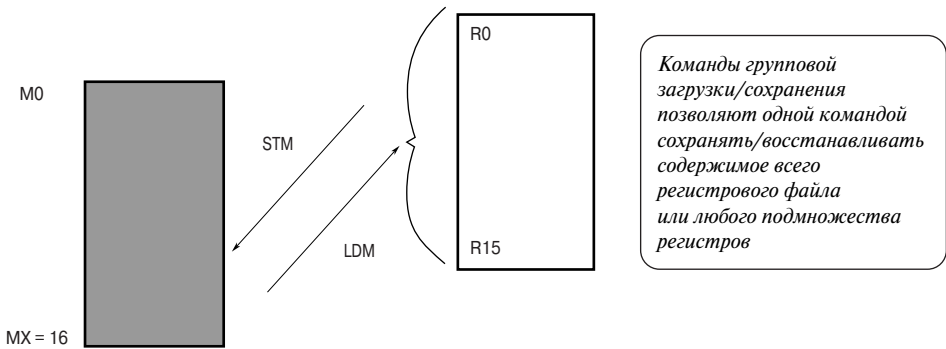


Рис. 1.13. Команды LDM и STM

Команда обмена

В наборе команд ARM имеется также команда обмена (SWP), благодаря которой обеспечивается поддержка семафоров реального времени. Эта атомарная команда осуществляет одновременный обмен содержимого регистра и памяти (Рис. 1.14). Благодаря такому решению предотвращается прерывание процесса обмена критическими данными при возникновении исключительной ситуации.

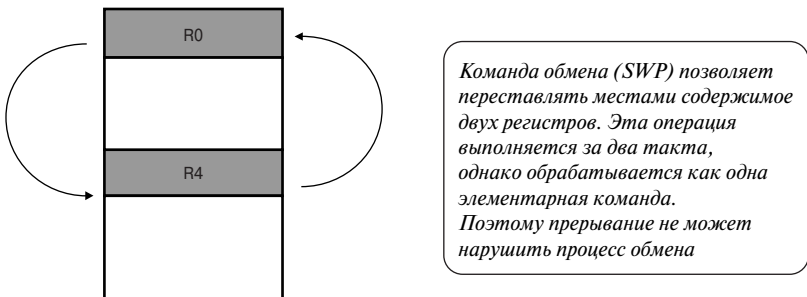


Рис. 1.14. Команда обмена

Эта команда недоступна из языка Си и поддерживается встроенными функциями библиотеки компилятора.