

Общее устройство центрального процессора и принципы его проектирования

Луцив Дмитрий Вадимович

Кафедра системного программирования СПбГУ



- 1 Блоки процессора
- 2 Одно-, многотактный процессоры
- 3 Конвейеризация
 - Конвейеры в реальной жизни
 - Вычислительные конвейеры
- 4 CISC- и RISC процессоры
 - Основы
 - Особенности конвейеризации

Блоки процессора

Арифметико-логическое устройство — блок процессора, выполняющий арифметические и логические операции

- В простейшем случае — просто логическая схема
- Может использоваться для прикладных (например, вычисления, заданные программистом) и служебных (например, адресная арифметика)
- Имеет несколько входов для операндов и выход, на который *мультиплексируются* выходы сумматора, мультипликатора и т.д.

Регистровый файл — блок процессора, включающий набор регистров; внутренняя память процессора

- Арифметические регистры
 - Аккумулятор
 - Ещё несколько [десятков] регистров
- Регистры состояний
 - Регистр флагов
- Адресные регистры
 - Указатель вершины стека
 - Указатель на текущую инструкцию
 - Указатель на данные [часто несколько]
 - Вспомогательные (например, сегментные)
- Служебные регистры
 - Хранение промежуточных значений, реализация протоколов (например, с ОЗУ) и т.д.

Блок выборки инструкций — блок процессора, выполняющий чтение очередных инструкций из памяти

- Читает из ОЗУ машинный код
 - Выполняет первичную интерпретацию машинного кода

Для CISC-процессоров со сложным машинным кодом это не так-то просто!

Блок выборки инструкций (устройство чтения программы)

Блок выборки инструкций — блок процессора, выполняющий чтение очередных инструкций из памяти

- Читает из ОЗУ машинный код
 - Выполняет первичную интерпретацию машинного кода

Для CISC-процессоров со сложным машинным кодом это не так-то просто!

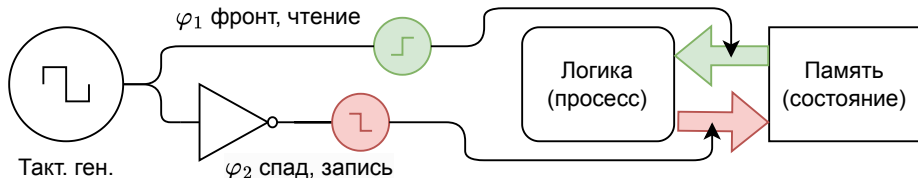
О том, что такое RISC и CISC, ещё немного позже.

Управляющее устройство — блок процессора, выдающий для исполнения машинных команд управляющие сигналы другим блокам

- В зависимости от команды, выдаёт управляющие сигналы другим блокам процессора
 - Сигналы преимущественно управляют мультиплексорами, т.е. задают *маршруты передачи данных между блоками процессора*
- Если команда выполняется за много тактов (а обычно так и есть), выдаёт не один сигнал, а *последовательность сигналов* разным блокам

Одно-, многотактный процессоры

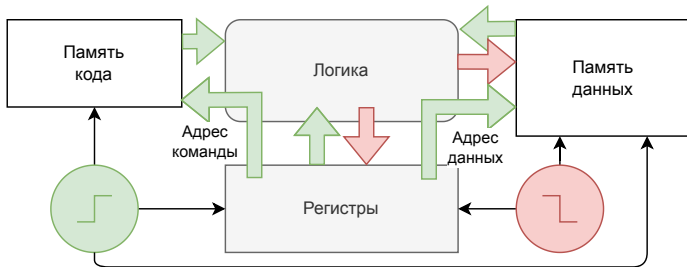
Однотактная схема



Вспоминаем:

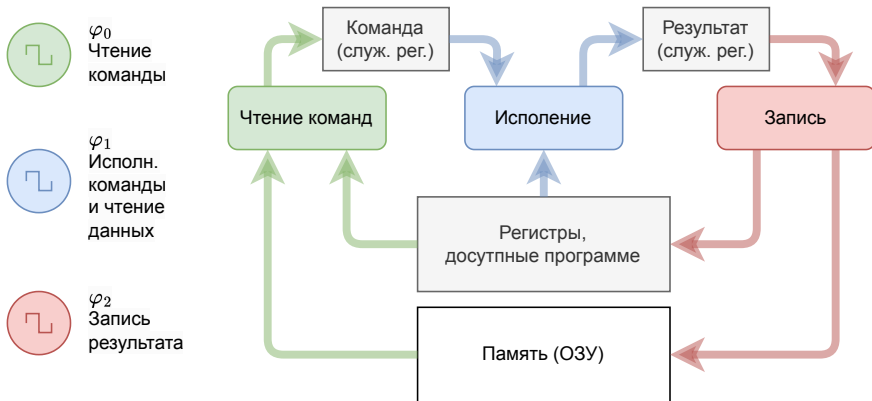
- ❶ Синхронные и асинхронные вычисления, тактовый генератор, тактовые импульсы и тактовую сеть
- ❷ Синхронизацию по фронту и спаду тактового импульса
- ❸ Связку «master-slave»
- ❹ Многофазные тактовые сигналы у старых процессоров

Однотактный процессор



- В принципе, он даже может работать
 - Можно «нарисовать», например, несложный контроллер с такой архитектурой
- Только гарвардский, т.к. нельзя одновременно обращаться и в одну память за кодом и данными

Многотактный процессор (упрощённый пример для 3 тактов)



- Используются три фазы — φ_0 , φ_1 , φ_2
 - Эти фазы может генерировать процессор внутри себя по сигналам обычного тактового генератора
- Разные фазы выполняются разными блоками по очереди
 - $\frac{2}{3}$ времени блоки процессора простаивают!

Конвейеризация

- Конвейеры в реальной жизни
- Вычислительные конвейеры

Конвейеризация «в жизни»

Предпосылки

Эли Уитни, 1798 (оружейное производство) — одновременное изготовление стандартизованных узлов мушкета разными рабочими, затем быстрая сборка готовых изделий

Реальные конвейеры

- Генри Форд, 1913 и т.д. — сборка электрогенераторов, затем моторов и целых автомобилей
 - Разные этапы производства выполняются разными рабочими
 - Рабочие работают одновременно, каждый на своём этапе
- Конвейер в системе образования
 - Школа: 1–11 классы — выпуск каждый год, но школьник учится 11 лет
 - Высшее образование: *старая* поговорка: Матмех — не школа, за *10 лет* не окончишь =)
- Конвейер в менеджменте
 - Конвейерное исполнение заказов

- Низкая гибкость — организованный и запущенный конвейер тяжело приспособить к изменяющейся ситуации
- Снижение качества результата в угоду массовости
 - Пример: товар есть на складе в моём городе, но почему-то едет с другого конца страны

- Низкая гибкость — организованный и запущенный конвейер тяжело приспособить к изменяющейся ситуации
- Снижение качества результата в угоду массовости
 - Пример: товар есть на складе в моём городе, но почему-то едет с другого конца страны

Выход: в менеджменте это преодолевается переходом от конвейера к организации бизнес-процессов — сложнее, но адаптивнее

Что такое конвейер?..

Вычислительный конвейер (водопровод, pipeline) — механизм распараллеливания выполнения машинных команд, позволяющий оптимально задействовать блоки процессора путём разбиения команд на стадии и распределения стадий по блокам

Конвейеры появились в 1950-х годах, термин «конвейер» (pipeline) ввёл конструктор советских ЭВМ С.А. Лебедев.

Пусть все команды выполняются за N тактов. Тогда, что даёт конвейеризация?

- Скорость выполнения отдельных команд:
 - Каждая команда выполняется за N тактов как с конвейером, так и без
 - В отношении одной команды на разных тактах задействованы разные блоки
- Скорость выполнения программы:
 - На каждом такте завершается очередная команда
 - Конвейеризация ускоряет работу программы в N раз, все блоки задействованы всё время

Что такое конвейер?..

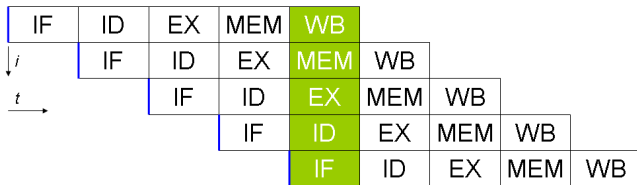
Вычислительный конвейер (водопровод, pipeline) — механизм распараллеливания выполнения машинных команд, позволяющий оптимально задействовать блоки процессора путём разбиения команд на стадии и распределения стадий по блокам

Конвейеры появились в 1950-х годах, термин «конвейер» (pipeline) ввёл конструктор советских ЭВМ С.А. Лебедев.

Пусть все команды выполняются за N тактов. Тогда, что даёт конвейеризация?

- Скорость выполнения отдельных команд:
 - Каждая команда выполняется за N тактов как с конвейером, так и без
 - В отношении одной команды на разных тактах задействованы разные блоки
- Скорость выполнения программы:
 - На каждом такте завершается очередная команда
 - Конвейеризация ускоряет работу программы в N раз, все блоки задействованы всё время
 - Косвенная выгода: «сосредоточение» отдельных стадий в компактных блоках позволяет увеличить тактовую частоту

Пример: Classic RISC Pipeline



Classic RISC Pipeline, Wikipedia

Применялся к популярным RISC-процессорам 1980-х: первым MIPS, Sun SPARC, Motorola 88000. Стадии:

- 1 IF (instruction fetch) — получение инструкции
- 2 ID (instruction decode) — декодирование инструкции
- 3 EX (execute) — выполнение инструкции, если нужно — первый такт доступа к данным в ОЗУ
- 4 MEM (memory access) — второй такт доступа к данным в ОЗУ или бездействие
- 5 WB (register write back) — запись в регистр

- ❶ Конфликты по данным между зависимыми машинными командами, например:
 - самая частая ситуация — следующей команде нужен результат предыдущей, но предыдущая ещё его не получила
 - следующая команда записывает данные до того, как их читает предыдущая
 - следующая команда записывает свои результаты раньше предыдущей из-за чего предыдущая потом может их перезаписать
- ❷ Конфликты по ресурсам — когда двум командам одновременно нужен эксклюзивный доступ к чему-либо (регистр, шина...)
- ❸ Конфликты по управлению: следующая команда является условным переходом, но условие для него ещё не вычислено предыдущей командой
 - и даже не ясно, из какой ветви дальше выбрать команды

- ❶ Конфликты по данным между зависимыми машинными командами, например:
 - самая частая ситуация — следующей команде нужен результат предыдущей, но предыдущая ещё его не получила
 - следующая команда записывает данные до того, как их читает предыдущая
 - следующая команда записывает свои результаты раньше предыдущей из-за чего предыдущая потом может их перезаписать
- ❷ Конфликты по ресурсам — когда двум командам одновременно нужен эксклюзивный доступ к чему-либо (регистр, шина...)
- ❸ Конфликты по управлению: следующая команда является условным переходом, но условие для него ещё не вычислено предыдущей командой
 - и даже не ясно, из какой ветви дальше выбрать команды

Спойлер: некоторые RISC процессоры, например ранние MIPS, исполняли до двух команд даже после *безусловного* перехода: конвейер успевал из «засосать» из памяти, не успевая ещё разобрать, что в них

- Pipeline Stall — торможение команд на конвейере; в предельном случае может свести преимущества конвейеризации на нет
- Предсказание условных переходов — сбор статистики о переходах или подсказки от компилятора

CISC- и RISC процессоры

- Основы
- Особенности конвейеризации

Пример программы и её трансляции (1: x86)

```
int a, b;    bool res;  
a = a + b;  
b = 3 * b;  
if ( a>b ) res = true;  
else    res = false;
```

Язык ассемблера x86 (32-битный) и машинный код:

<i>; Команды процессора</i>	<i>Адр. Машинный код</i>	<i>Комментарий</i>
<i>; -----</i>	<i>-- -----</i>	<i>-----</i>
mov eax,DWORD PTR [ebp-0xc]	<i>; 00 8b 45 f4</i>	<i>рег. EAX := пер. a из пам</i>
add eax,DWORD PTR [ebp-0x8]	<i>; 03 03 45 f8</i>	<i>рег. EAX += пер. b из пам</i>
mov DWORD PTR [ebp-0xc],eax	<i>; 06 89 45 f4</i>	<i>пер. b в памяти := рег EAX</i>
imul ecx,DWORD PTR [ebp-0x8],0x3	<i>; 09 6b 4d f8 03</i>	<i>рег. ECX := 3 * пер. b</i>
mov DWORD PTR [ebp-0x8],ecx	<i>; 0d 89 4d f8</i>	<i>пер. b в пам := рег. ECX</i>
mov edx,DWORD PTR [ebp-0xc]	<i>; 10 8b 55 f4</i>	<i>рег. EDX := пер. a</i>
cmp edx,DWORD PTR [ebp-0x8]	<i>; 13 3b 55 f8</i>	<i>сравн. EDX <=> пер. b</i>
jle 1e	<i>; 16 7e 06</i>	<i>if (<=) goto 0x1e</i>
mov BYTE PTR [ebp-0x1],0x1	<i>; 18 c6 45 ff 01</i>	<i>res = true</i>
jmp 22	<i>; 1c eb 04</i>	<i>goto 0x22</i>
mov BYTE PTR [ebp-0x1],0x0	<i>; 1e c6 45 ff 00</i>	<i>res = false</i>
	<i>; 22</i>	

Пример программы и её трансляции (2: ARMv7, RISC-V)

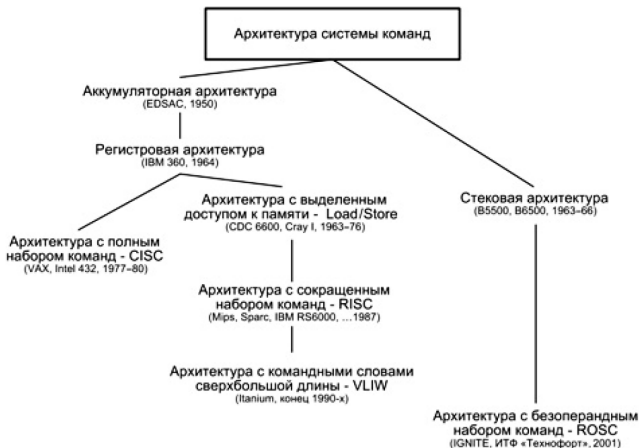
```
ldr r2,[sp,#8]
ldr r3,[sp,#4]
add r3,r3,r2
str r3,[sp,#8]
ldr r2,[sp,#4]
movs r3,#3
mul r3,r2,r3
str r3,[sp,#4]
ldr r2,[sp,#8]
ldr r3,[sp,#4]
cmp r2,r3
ble |$LN2@main|
movs r3,#1
strb r3,[sp]
b |$LN3@main|
|$LN2@main|
movs r3,#0
strb r3,[sp]
|$LN3@main|
movs r3,#0
```

```
int a, b;    bool res;
a = a + b;
b = 3 * b;
if ( a>b ) res = true;
else    res = false;
```

```
lw      a4,-24(s0)
lw      a5,-28(s0)
add     a5,a4,a5
sw      a5,-24(s0)
lw      a4,-28(s0)
mv      a5,a4
slli   a5,a5,1
add     a5,a5,a4
sw      a5,-28(s0)
lw      a4,-24(s0)
lw      a5,-28(s0)
ble     a4,a5,.L2
li      a5,1
sb      a5,-17(s0)
j       .L3
.L2: sb  zero,-17(s0)
.L3: lui a5,%hi(r)
      lbu a4,-17(s0)
      sb  a4,%lo(r)(a5)
      nop
      lw  s0,28(sp)
      addi sp,sp,32
      jr  ra
```

Что отличало данные примеры?

Система команд — соглашение о средствах, предоставляемых машинным языком и о структуре машинного языка



Орлов С.А., Цилькер Б.Я. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. 2-е изд. — СПб.: Питер, 2011. — 688 с.

CISC — Complicated Instruction Set Computer

- Много способов адресовать аргументы команд
- Смешанная адресация — разные операнды из разных мест
- Команды похожи на операторы языков высокого уровня
- Ассемблер дружелюбный
- Небольшое количество сильно умных команд
- Реализованы при помощи микропрограмм
- Машинный код экономный в смысле занимаемого места в памяти (многие «популярные» команды занимают 1 байт)

Примеры:

IBM/360..z-Architecture, Intel x86 и x86_64, Intel 8080 и Zilog Z80

RISC — Reduced Instruction Set Computer

- Отдельные команды для обмена данными с памятью
- Команды простые
 - Команды выполняются за фиксированное время (фиксированное количество тактов)
 - Это упрощает конвейеризацию
- Некоторые «долгие» команды выполняются асинхронно
- Ассемблер недружественный
 - Помните про «глупый всеядный» конвейер?
- Машинный код не экономный, все команды занимают одно машинное слово
 - В некоторых режимах половину

Примеры:

Cray CDC 6600 (1960-е), и большинство новых семейств, начиная с 1980-х: MIPS, SPARC, ARM, RISC-V

CISC vs RISC: недружественный ассемблер — это страшно?

Нет.

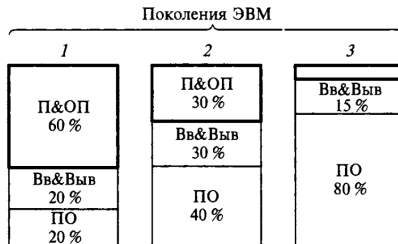


Рис. 2.3. Распределение стоимости между компонентами ЭВМ:

П&ОП — процессор и оперативная память; Вв&Выв — устройство ввода-вывода информации; ПО — программное обеспечение

Архитектура вычислительных систем.: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 520 с.

- Cray CDC 6600 — суперкомпьютер середины 1960-х, можно было программировать дорого, т.к. он и сам был очень дорогой
- Большинство — 1980-е и позже, программируются уже на языках высокого уровня

Особенности и трудности

У RISC простой формат машинного кода, простой блок выборки инструкций, простой конвейер. Иногда есть несколько «долгих» команд, которые выполняются асинхронно

Некоторые RISC-семейства не отслеживают конфликты и не обрабатывают их!

Особенности и трудности

У RISC простой формат машинного кода, простой блок выборки инструкций, простой конвейер. Иногда есть несколько «долгих» команд, которые выполняются асинхронно

Некоторые RISC-семейства не отслеживают конфликты и не обрабатывают их!

Решения

- Переупорядочивание команд — конфликтующие команды размещаются «на безопасном расстоянии» друг от друга
- Торможение при помощи вставки «пузырька» (инструкция пор, по operation)

Для некоторых RISC-семейств всё это делает компилятор или программист!

Процессор полностью сам отвечает за корректное исполнение кода — обнаруживает конфликты и обрабатывает их.

Процессор с конвейером должен (кроме скорости) работать так же, как и без конвейера.

Вопросы

- Назовите и определите основные блоки процессора.
- Что такое вычислительный конвейер?
- Во сколько раз может максимально ускорить выполнение программы конвейер, выполняющий команды в 3 этапа?
- Назовите виды конфликтов конвейера.
- Как RISC-процессоры разрешают конфликты конвейера?
- Как CISC-процессоры разрешают конфликты конвейера?

Вопросы



[EDU.DLUCIV.NAME](#) 