Машинный уровень 2: Управление

Основы информатики

Компьютерные основы программирования

goo.gl/X7evF

На основе CMU 15-213/18-243:

Introduction to Computer Systems

goo.gl/Q7vgWw

Лекция 5, 05 марта, 2018

Лектор:

Дмитрий Северов, кафедра информатики 608 КПМ

dseverov@mail.mipt.ru

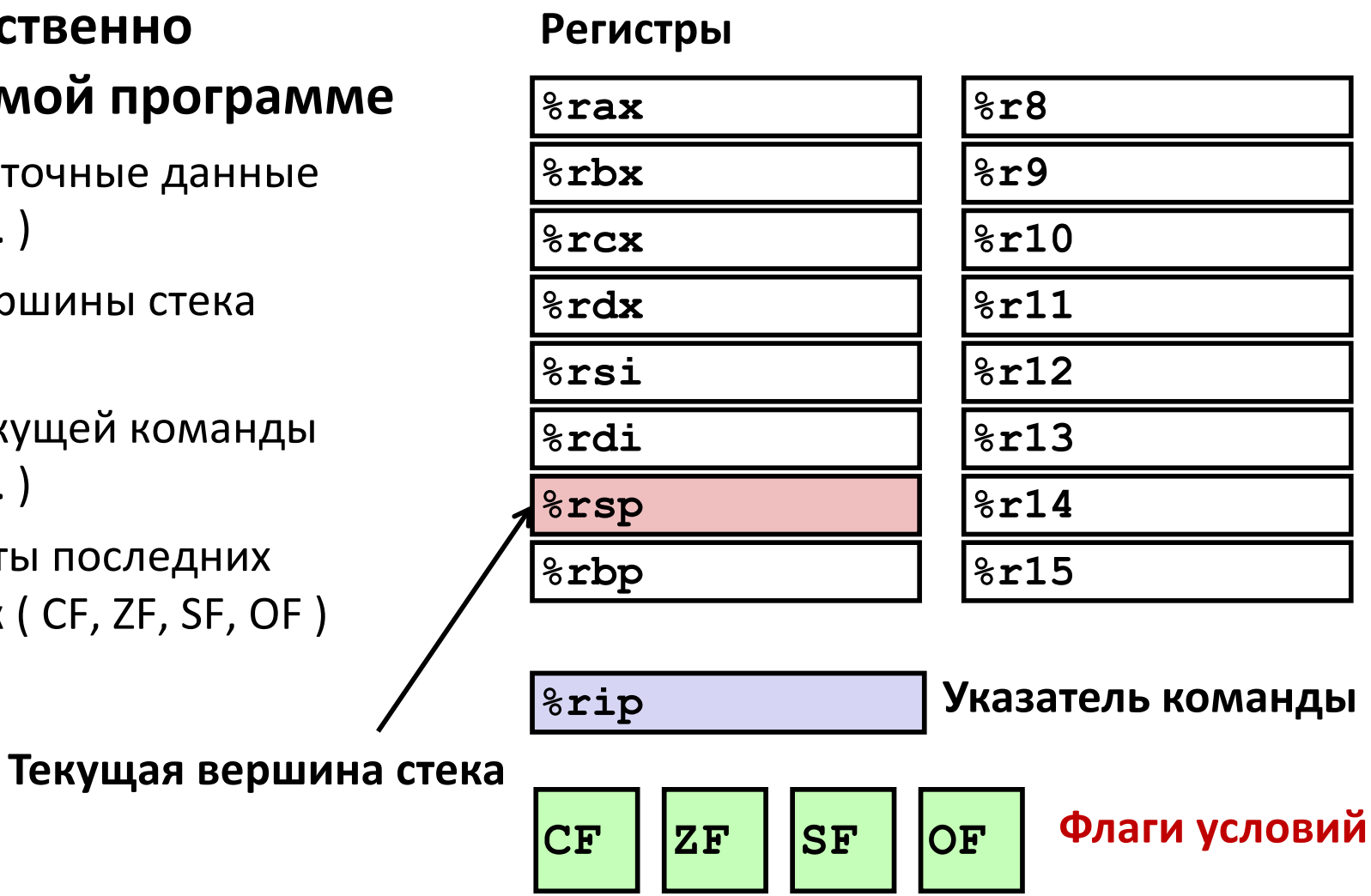
cs.mipt.ru/wp/?page_id=346

Машинный уровень 2: Управление

- **Управление: флаги условий**
- **Условные переходы и пересылки**
- **Циклы**
- **Операторы переключения**
- **Процедуры IA 32**
  - Структура стека
  - Соглашения вызова процедур
  - Рекурсия и указатели

Состояние процессора (x86-64, частично)

- **Информация о непосредственно исполняемой программе**
  - Промежуточные данные (**%rax**, …)
  - Адрес вершины стека (**%rsp**)
  - Адрес текущей команды (**%rip**, …)
  - Результаты последних проверок (CF, ZF, SF, OF)



Флаги условий (неявная установка)

- **Однобитные регистры- флаги**
  - CF перенос (для unsigned) SF знак (для signed)
  - ZF ноль OF переполнение (для signed)

- **Устанавливаются арифметическими операциями неявно (как побочный результат)**

  Пример: **`addq` Src,Dest** ↔ `t = a+b`

  CF=1, если перенос в старший бит или заём из него (беззнаковое переполнение)

  ZF=1, если `t == 0`

  SF=1, если `t < 0` (как знаковое), SF == MSB

  OF=1, если переполнился дополнительный код (знаковый)

```
(a>0 && b>0 && t<0) || (a<0 && b<0 && t>=0)
```

- **Не устанавливаются командой `lea`!**

Флаги условий (явная установка сравнением)

- **Явная установка командами сравнения**
  - **`cmpq` Src2, Src1**
  - **`cmpq b,a`** как вычисление **`a-b`** без сохранения результата

  - CF=1, если перенос из старшего бита или заём в него
    (используется при беззнаковых сравнениях)
  - ZF=1, если **`a == b`**
  - SF=1, если **`(a-b) < 0`** (как знаковые)
  - OF=1, переполнение в дополнительном коде (знаковое)

```
(a>0 && b<0 && (a-b)<0) || (a<0 && b>0 && (a-b)>0)
```

Флаги условий (явная установка проверкой бит)

- **Явная установка командой test**
  - **`testq` Src2, Src1**
    - **`testq b,a`** как вычисление **`a&b`** без сохранения результата
  - Устанавливает флаги в зависимости от Src1 & Src2
  - Удобно, если один из операндов - маска
  - ZF=1, если **`a&b == 0`**
  - SF=1, если **`a&b < 0`** (старший бит == 1)

Чтение флагов условий IA32 - 1

- **Команды set***
  - Устанавливают <u>один байт</u> в 1 или 0 в зависимости от флагов
  - Не изменяют остальные 7 байт

Команда	Условие	Описание
`sete`	`ZF`	Равно / Ноль
`setne`	`~ZF`	Неравно / Не ноль
`sets`	`SF`	Отрицательно
`setns`	`~SF`	Неотрицательно
`setg`	`~(SF^OF)&~ZF`	Больше (знаковое)
`setge`	`~(SF^OF)`	Больше или равно (знаковое)
`setl`	`(SF^OF)`	Меньше (знаковое)
`setle`	`(SF^OF)|ZF`	Меньше или равно (знаковое)
`seta`	`~CF&~ZF`	Выше (беззнаковое)
`setb`	`CF`	Ниже (unsigned)

x86-64 Целочисленные регистры

%rax	%al	%r8	%r8b
%rbx	%bl	%r9	%r9b
%rcx	%cl	%r10	%r10b
%rdx	%dl	%r11	%r11b
%rsi	%sil	%r12	%r12b
%rdi	%dil	%r13	%r13b
%rsp	%spl	%r14	%r14b
%rbp	%bpl	%r15	%r15b

- Можно обращаться к младшим байтам

Чтение флагов условий - 2

- **Команды set***
  - Устанавливают <u>один байт</u> в 1 или 0 в зависимости от флагов
- **Один из 8 байтовых регистров**
  - Не изменяются остальные байты регистра
  - Зануление остатка обычно – **`movzbl`**
    - 32-битные команды зануляют старшие 32 бита

```
int gt (long x, long y)
{
  return x > y;
}
```

Регистр	Применение
`%rdi`	аргумент **`x`**
`%rsi`	аргумент **`y`**
`%rax`	результат

```
cmpq   %rsi, %rdi   # Сравнение x:y
setg   %al          # Установка младшего байта %rax в 1 если >
movzbl %al, %eax    # Зануление остальных байт %rax
ret
```

Машинный уровень 2: Управление

- **Управление: флаги условий**
- **Условные переходы и пересылки**
- **Циклы**
- **Операторы переключения**
- **Процедуры IA 32**
  - Структура стека
  - Соглашения вызова процедур
  - Рекурсия и указатели

Переходы

- **Команды j***
  - Передача управления по адресу в зависимости от флагов

j*	Условия	Описание
`jmp`	`1`	**Безусловный**
`je`	`ZF`	**Равно / Ноль**
`jne`	`~ZF`	**Неравно / Не ноль**
`js`	`SF`	**Отрицательно**
`jns`	`~SF`	**Неотрицательно**
`jg`	`~(SF^OF)&~ZF`	**Больше (знаковое)**
`jge`	`~(SF^OF)`	**Больше или равно (знаковое)**
`jl`	`(SF^OF)`	**Меньше (знаковое)**
`jle`	`(SF^OF)|ZF`	**Меньше или равно (знаковое)**
`ja`	`~CF&~ZF`	**Выше (беззнаковое)**
`jb`	`CF`	**Ниже (беззнаковое)**

Пример условного ветвления (по старинке)

- **Создание**

```
> gcc -Og -S -fno-if-conversion control.c
```

```
long absdiff
  (long x, long y)
{
  long result;
  if (x > y)
    result = x-y;
  else
    result = y-x;
  return result;
}
```

```
absdiff:
    cmpq    %rsi, %rdi   # x:y
    jle     .L4
    movq    %rdi, %rax
    subq    %rsi, %rax
    ret
.L4:        # x <= y
    movq    %rsi, %rax
    subq    %rdi, %rax
    ret
```

Регистр	Применение
`%rdi`	аргумент **x**
`%rsi`	аргумент **y**
`%rax`	результат

Представление «go to» кодом

- Си допускает оператор `goto`
- Переход в точку, обозначенную меткой

```
long absdiff
  (long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

```
long absdiff_j
  (long x, long y)
{
    long result;
    int ntest = x <= y;
    if (ntest) goto Else;
    result = x-y;
    goto Done;
 Else:
    result = y-x;
 Done:
    return result;
}
```

Трансляция условного выражения в общем (используя ветвление)

Си код

```
val = Test ? Then_Expr : Else_Expr;
```

```
val = x>y ? x-y : y-x;
```

"goto" версия

```
  nt = !Test;
  if (nt) goto Else;
  val = Then_Expr;
  goto Done;
Else:
  val = Else_Expr;
Done:
  . . .
```

- Test – целочисленное выражение
  - = 0 интерпретируется как ложь
  - ≠ 0 интерпретируется как истина
- Создаёт раздельные фрагменты кода для **Then_Expr** и **Else_Expr**
- Исполняется только один из двух

Использование условной пересылки

- **Команды условной пересылки**
  - Команды поддерживают:

    if (Test) Dest ← Src
  - Есть в x86 процессорах после 1995г.
  - GCC пытается использовать их
    - Но, только в безопасных случаях!
- **А зачем?**
  - Переходы разрушают конвейерное исполнение инструкций
  - Условная пересылка не вызывает передачи управления

Си код

```
val = Test
    ? Then_Expr
    : Else_Expr;
```

“goto” версия

```
  result = Then_Expr;
  eval = Else_Expr;
  nt = !Test;
  if (nt) result = eval;
  return result;
```

Пример условной пересылки

```
long absdiff
  (long x, long y)
{
    long result;
    if (x > y)
        result = x-y;
    else
        result = y-x;
    return result;
}
```

Регистр	Применение
%rdi	аргумент **x**
%rsi	аргумент **y**
%rax	результат

```
absdiff:
    movq    %rdi, %rax   # x
    subq    %rsi, %rax   # result = x-y
    movq    %rsi, %rdx
    subq    %rdi, %rdx   # eval = y-x
    cmpq    %rsi, %rdi   # x:y
    cmovle  %rdx, %rax   # if <=, result = eval
    ret
```

Неудачные применения усл. пересылки

Ресурсоёмкие вычисления

```
val = Test(x) ? Hard1(x) : Hard2(x);
```

- Оба значения вычисляются
- Имеет смысл только для очень простых выражений

Рискованые вычисления

```
val = p ? *p : 0;
```

- Оба значения вычисляются
- Возможен нежелательный эффект

Вычисления с побочным эффектом

```
val = x > 0 ? x*=7 : x+=3;
```

- Оба значения вычисляются
- Побочные эффекты должны исключаться

Машинный уровень 2: Управление

- **Управление: флаги условий**
- **Условные переходы и пересылки**
- **Циклы**
- **Операторы переключения**
- **Процедуры IA 32**
  - Структура стека
  - Соглашения вызова процедур
  - Рекурсия и указатели

Пример цикла “do-while”

Си код

```
long pcount_do
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
  do {
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
  } while (x);
  return result;
}
```

“goto” версия

```
long pcount_goto
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
 loop:
  result += x & 0x1;
  x >>= 1;
  if(x) goto loop;
  return result;
}
```

- **Подсчитывает количество единичных бит в аргументе x (подсчёт выталкиванием)**
- **Использует условный переход для зацикливания или выхода из цикла**

Компиляция цикла “do-while”

“goto” версия

```
long pcount_goto
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
 loop:
  result += x & 0x1;
  x >>= 1;
  if(x) goto loop;
  return result;
}
```

Регистры	Применение
%rdi	аргумент x
%rax	результат

```
   movl    $0, %eax    #  result = 0
.L2:                 # loop:
   movq    %rdi, %rdx
   andl    $1, %edx    #  t = x & 0x1
   addq    %rdx, %rax  #  result += t
   shrq    %rdi        #  x >>= 1
   jne     .L2         #  if (x) goto loop
   rep; ret
```

Компиляция “do-while” в общем

Си код

```
do
  Тело
  while (Условие);
```

“goto” версия

```
loop:
  Тело
  if (Условие)
    goto loop
```

- **Тело:**

```
{
  оператор1;
  оператор2;
    …
  операторn;
}
```

Трансляция “while” в общем №1

- **Трансляция “переход-в-середину”**
- **Используется при –Og**

“while” версия

```
while (Условие)
  Тело
```

“goto” версия

```
  goto test;
loop:
  Тело
test:
  if (Условие)
    goto loop;
done:
```

Пример цикла “while” №1

Си код

```
long pcount_while
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
  while (x) {
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
  }
  return result;
}
```

Переход в середину

```
long pcount_goto_jtm
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
  goto test;
 loop:
  result += x & 0x1;
  x >>= 1;
 test:
  if(x) goto loop;
  return result;
}
```

- **Отличие от do-while**
  - Начальный goto начинает цикл с проверки

Компиляция “while” в общем №2

“while” версия

```
while (Условие)
  Тело
```

- **сведение к “do-while”**
- **Используется при –O1**

“do-while” версия

```
  if (!Условие)
    goto done;
  do
     Тело
    while(Условие);
done:
```

“goto” версия

```
  if (!Условие)
    goto done;
loop:
  Тело
  if (Условие)
    goto loop;
done:
```

Пример цикла “while” №2

Си код

```
long pcount_while
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
  while (x) {
    result += x & 0x1;
    x >>= 1;
  }
  return result;
}
```

“do-while” версия

```
long pcount_goto_dw
  (unsigned long x) {
  long result = 0;
  if (!x) goto done;
 loop:
  result += x & 0x1;
  x >>= 1;
  if(x) goto loop;
 done:
  return result;
}
```

- **Отличие от “do-while”**
  - Начальное условие защищает вход в цикл

Общая форма цикла “for”

Общая форма

```
for (Начало; Условие; Изменение )
                Тело
```

```
#define WSIZE 8*sizeof(int)
long pcount_for
  (unsigned long x)
{
  size_t i;
  long result = 0;
  for (i = 0; i < WSIZE; i++)
  {
    unsigned bit =
      (x >> i) & 0x1;
    result += bit;
  }
  return result;
}
```

Начало

```
i = 0
```

Условие

```
i < WSIZE
```

Изменение

```
i++
```

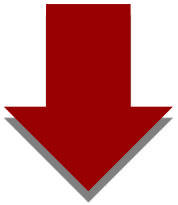
Тело

```
{
  unsigned bit =
      (x >> i) & 0x1;
  result += bit;
}
```

Цикл “for” → цикл “while”

“for” версия

```
for(Начало;  Условие;  Изменение )
                    Тело
```



“while” версия

```
Начало;
while (Условие) {
    Тело
    Изменение;
}
```

Преобразование for-while

Начало

```
i = 0
```

Условие

```
i < WSIZE
```

Изменение

```
i++
```

Тело

```
{
  unsigned bit =
      (x >> i) & 0x1;
  result += bit;
}
```

```
long pcount_for_while
  (unsigned long x)
{
  size_t i;
  long result = 0;
  i = 0;
  while (i < WSIZE)
  {
    unsigned bit =
      (x >> i) & 0x1;
    result += bit;
    i++;
  }
  return result;
}
```

Преобразование цикла “for”-“do-while”

Си код

```
long pcount_for
  (unsigned long x)
{
  size_t i;
  long result = 0;
  for (i = 0; i < WSIZE; i++)
  {
    unsigned bit =
      (x >> i) & 0x1;
    result += bit;
  }
  return result;
}
```

“goto” версия

```
long pcount_for_goto_dw
  (unsigned long x) {
  size_t i;
  long result = 0;
  i = 0;                    Начало
  if (!(i < WSIZE))
    goto done;              !Условие
 loop:
  {
    unsigned bit =
      (x >> i) & 0x1;       Тело
    result += bit;
  }
  i++;  Изменение
  if (i < WSIZE)
    goto loop;              Условие
 done:
  return result;
}
```

- **Начальное условие может быть оптимизировано**

Машинный уровень 2: Управление

- **Управление: флаги условий**
- **Условные переходы и пересылки**
- **Циклы**
- **Операторы переключения**
- **Процедуры IA 32**
  - Структура стека
  - Соглашения вызова процедур
  - Рекурсия и указатели

```
long switch_eg
   (long x, long y, long z)
{
    long w = 1;
    switch(x) {
    case 1:
        w = y*z;
        break;
    case 2:
        w = y/z;
        /* Переход к другому */
    case 3:
        w += z;
        break;
    case 5:
    case 6:
        w -= z;
        break;
    default:
        w = 2;
    }
    return w;
}
```

Пример оператора switch

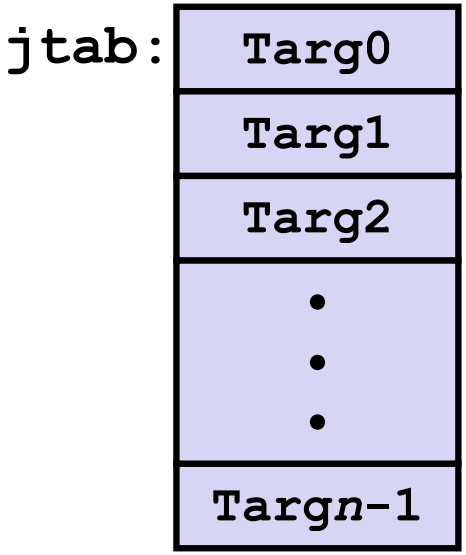
- **Совмещённые варианты**
  - case 5 и case 6
- **Переход к другому варианту**
  - Из case 2 в case 3
- **Отсутствующие варианты**
  - case 4

Структура таблицы переходов

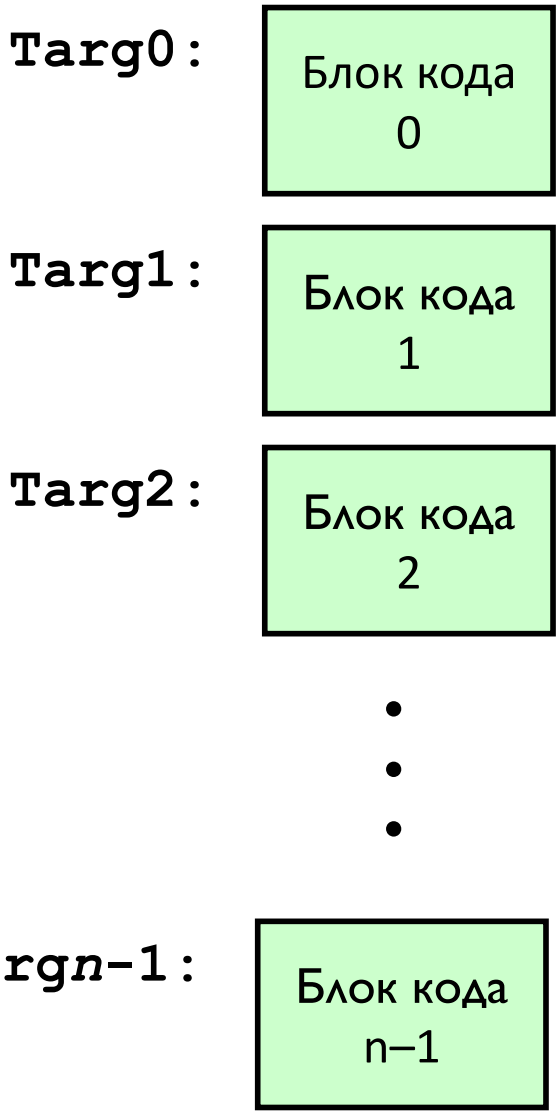
В виде switch

```
switch(x) {
  case val_0:
    Блок 0
  case val_1:
    Блок 1
    • • •
  case val_n-1:
    Блок n–1
}
```

Таблица переходов



Цели переходов



Приблизительный перевод

```
goto *JTab[x];
```

Пример оператора перехода

```
long switch_eg(long x, long y, long z)
{
    long w = 1;
    switch(x) {
      . . .
    }
    return w;
}
```

Пролог:

```
switch_eg:
    movq    %rdx, %rcx
    cmpq    $6, %rdi    # x:6
    ja      .L8
    jmp     *.L4(,%rdi,8)
```

Какой диапазон значений определён местом default?

Регистры	Использование
%rdi	аргумент **x**
%rsi	аргумент **y**
%rdx	аргумент **z**
%rax	результат

w инициализирован не здесь !

Пример оператора перехода

```
long switch_eg(long x, long y, long z)
{
    long w = 1;
    switch(x) {
      . . .
    }
    return w;
}
```

Таблица переходов

```
.section    .rodata
  .align 8
.L4:
  .quad     .L8   # x = 0
  .quad     .L3   # x = 1
  .quad     .L5   # x = 2
  .quad     .L9   # x = 3
  .quad     .L8   # x = 4
  .quad     .L7   # x = 5
  .quad     .L7   # x = 6
```

Пролог:

```
switch_eg:
    movq    %rdx, %rcx
    cmpq    $6, %rdi          # x:6
    ja      .L8               # переход к default
    jmp     *.L4(,%rdi,8)     # goto *JTab[x]
```

Косвенный переход

Пояснения к ассемблерному прологу

- **Структура таблицы**
  - Каждый переход требует 8 байт
  - Базовый адрес (начало) **`.L4`**

Таблица переходов

```
.section    .rodata
  .align 8
.L4:
  .quad     .L8   # x = 0
  .quad     .L3   # x = 1
  .quad     .L5   # x = 2
  .quad     .L9   # x = 3
  .quad     .L8   # x = 4
  .quad     .L7   # x = 5
  .quad     .L7   # x = 6
```

- **Переход**
  - Прямой: **`jmp .L8`**
  - Цель перехода обозначена меткой **`.L8`**
  - Косвенный: **`jmp *.L4(,%rdi,8)`**
  - Начало таблицы переходов: **`.L4`**
  - Масштабный множитель 8 (адреса - 8 байт)
  - Адрес перехода – в ячейке по эффективному адресу **`.L4 + x*8`**
    - Только для $0 \le \mathbf{x} \le 6$

Таблица переходов

```
.section    .rodata
  .align 8
.L4:
  .quad     .L8   # x = 0
  .quad     .L3   # x = 1
  .quad     .L5   # x = 2
  .quad     .L9   # x = 3
  .quad     .L8   # x = 4
  .quad     .L7   # x = 5
  .quad     .L7   # x = 6
```

```
switch(x) {
case 1:       // .L3
    w = y*z;
    break;
case 2:       // .L4
    w = y/z;
    /* Fall Through */
case 3:       // .L5
    w += z;
    break;
case 5:
case 6:       // .L6
    w -= z;
    break;
default:      // .L2
    w = 2;
}
```

Блоки кода (x == 1)

```
  switch(x) {
  case 1:       // .L3
        w = y*z;
        break;
   . . .
}
```

```
.L3:
   movq    %rsi, %rax  # y
   imulq   %rdx, %rax  # y*z
   ret
```

Регистры	Использование
`%rdi`	аргумент **x**
`%rsi`	аргумент **y**
`%rdx`	аргумент **z**
`%rax`	результат

Рализация перехода к другому

```
long w = 1;
   . . .
switch(x) {
   . . .
case 2:
    w = y/z;
    /* Fall Through */
case 3:
    w += z;
    break;
   . . .
}
```

```
case 2:
        w = y/z;
        goto merge;
```

```
case 3:
        w = 1;
```

```
merge:
        w += z;
```

Блоки кода (x == 2, x == 3)

```
long w = 1;
   . . .
switch(x) {
   . . .
case 2:
    w = y/z;
    /* Fall Through */
case 3:
    w += z;
    break;
   . . .
}
```

```
.L5:                        # Case 2
   movq    %rsi, %rax
   cqto
   idivq   %rcx             #  y/z
   jmp     .L6              #  goto merge
.L9:                        # Case 3
   movl    $1, %eax         #  w = 1
.L6:                        # merge:
   addq    %rcx, %rax       #  w += z
   ret
```

Регистры	Использование
`%rdi`	аргумент **x**
`%rsi`	аргумент **y**
`%rdx`	аргумент **z**
`%rax`	результат

Блоки кода (x == 5, x == 6, default)

```
  switch(x) {
    . . .
    case 5:  // .L7
    case 6:  // .L7
        w -= z;
        break;
    default: // .L8
        w = 2;
}
```

```
.L7:                    # Case 5,6
  movl   $1, %eax       #  w = 1
  subq   %rdx, %rax     #  w -= z
  ret
.L8:                    # Default:
  movl   $2, %eax       #  2
  ret
```

Регистры	Использование
`%rdi`	аргумент **x**
`%rsi`	аргумент **y**
`%rdx`	аргумент **z**
`%rax`	результат

Промежуточный итог

- **Управление в Си**
  - if-then-else
  - do-while
  - while, for
  - switch
- **Управление в ассемблере**
  - Условный переход
  - Условная пересылка
  - Косвенный переход (по таблице переходов)
  - Компилятор создаёт код для более сложного управления
- **Стандартные приёмы**
  - Циклы преобразуются в форму do-while или переход-в-середину
  - Большие switch используют таблицы переходов
  - Разреженные switch могут использовать решающие деревья