7. Форма статического единственного присваивания (*SSA*-форма)

6.1 Форма статического единственного присваивания (SSA-форма)

6.1.1. Постановка задачи

◊ *Форма статического единственного присваивания* (*SSA*) позволяет в каждой точке программы объединить

- информацию об имени переменной
- и информацию о текущем значении этой переменной

(или, что то же самое, информацию о том, ***какое из определений данной переменной определяет ее текущее значение в данной точке***).

6.1 Форма статического единственного присваивания (*SSA-форма*)

6.1.1. Постановка задачи

◊ *Форма статического единственного присваивания* (*SSA*) позволяет в каждой точке программы объединить

- информацию об имени переменной
- и информацию о текущем значении этой переменной

(или, что то же самое, информацию о том, ***какое из определений данной переменной определяет ее текущее значение в данной точке***).

◊ Хотелось бы, чтобы программа в *SSA*-форме удовлетворяла двум условиям:

(1) каждое определение переменной имеет индивидуальное имя;

(2) каждое использование переменной ссылается на единственное определение.

6.1 Форма статического единственного присваивания (SSA-форма)

6.1.1. Постановка задачи

◊ *Форма статического единственного присваивания* (*SSA*) позволяет в каждой точке программы объединить

- ◊ информацию об имени переменной
- ◊ и информацию о текущем значении этой переменной

(или, что то же самое, информацию о том, ***какое из определений данной переменной определяет ее текущее значение в данной точке***).

Исходная программа **Обычное представление** **Представление в SSA-форме**

```
int bar();
void foo(int a) {
    int b = a + 3;
    b = bar(b);
    b = a + 3;
    b = b + a;
}
```

→

```
foo:
    param a
    b = a + 3
    b = bar(b)
    b = a + 3
    b = b + a
```

→

```
foo:
    param a.0
    b.0 = a.0 + 3
    b.1 = bar(b.0)
    b.2 = a.0 + 3 // <- b.0
    b.3 = b.2 + a.0
```

Исходная программа

```
int bar();
void foo(int a)
{
    int b = 0;
    b = bar();
    b = a + 3;
    if (a == 0)
    {
        b = b * 4;
    }
    b = b + a;
}
```


Обычное представление

```
foo:
    param a
    b = 0
    b = bar()
    b = a + 3
    if (a != 0) goto next
    b = b * 4

next:
    b = b + a
```


Представление в SSA-форме

```
foo:
    param a.0
    b.0 = 0
    b.1 = bar()
    b.2 = a.0 + 3
    if (a.0 == 0) goto l1 : l2

l1:
    b.3 = b.2 * 4

l2:

    b.4 = b.? + a.0
```

Исходная программа

```
int bar();
void foo(int a)
{
    int b = 0;
    b = bar();
    b = a + 3;
    if (a == 0)
    {
        b = b * 4;
    }
    b = b + a;
}
```


Обычное представление

```
foo:
    param a
    b = 0
    b = bar()
    b = a + 3
    if (a != 0) goto next
    b = b * 4

next:
    b = b + a
```

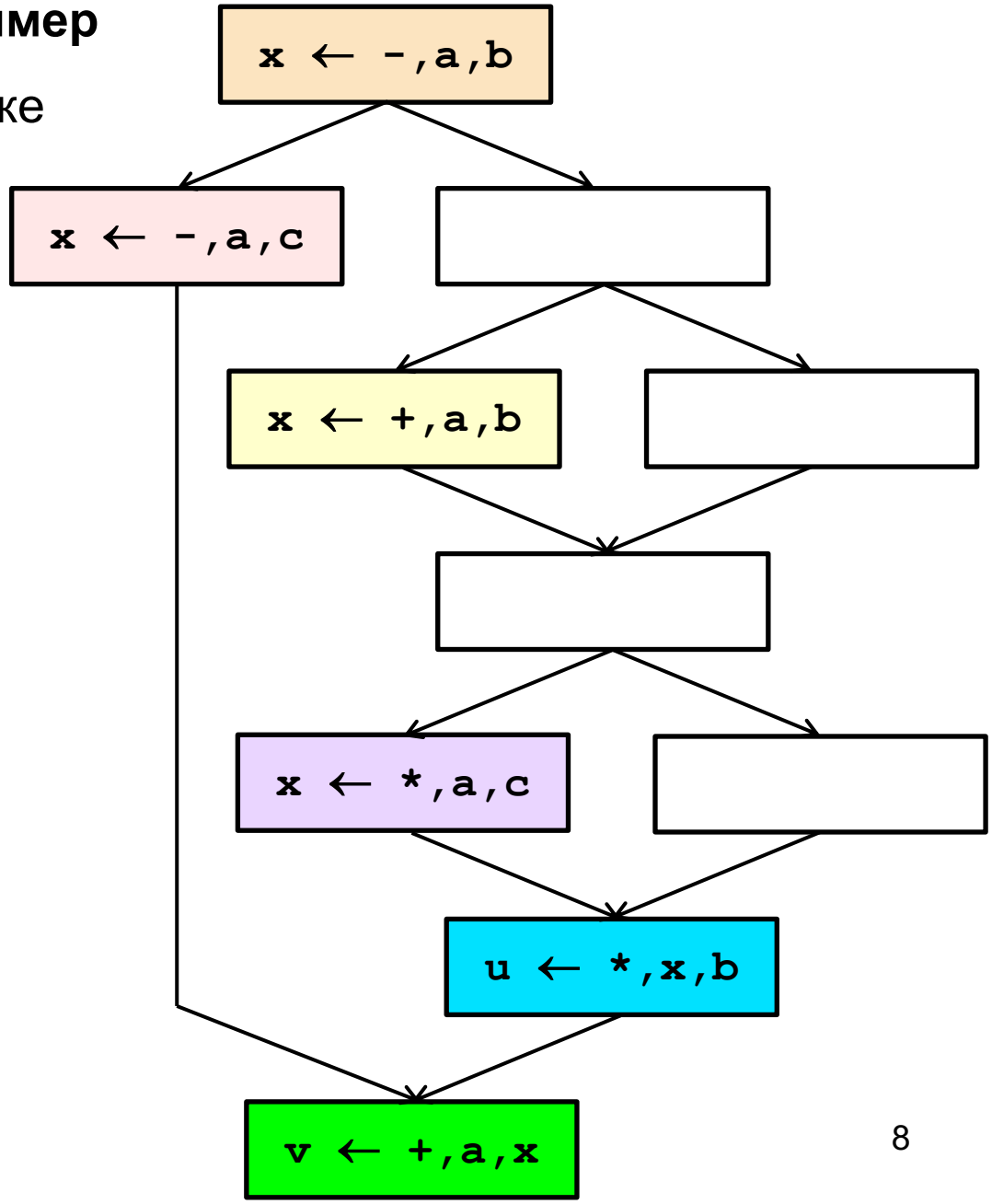

Представление в SSA-форме

```
foo:
    param a.0
    b.0 = 0
    b.1 = bar()
    b.2 = a.0 + 3
    if (a.0 == 0) goto l1 : l2

l1:
    b.3 = b.2 * 4

l2:
    b.4 = phi(b.2, b.3)
    b.5 = b.4 + a.0
```

6.1 SSA-форма

6.1.1. Постановка задачи. Пример

- ◊ Фрагмент ГПУ на рисунке содержит четыре определения **x**
- ◊ Использования в синем блоке достигают три определения **x**, в зеленом – четыре определения **x**
- ◊ Цель же состоит в том, чтобы ***каждого использования достигало только одно определение***



6.1 SSA-форма

6.1.1. Постановка задачи. Пример

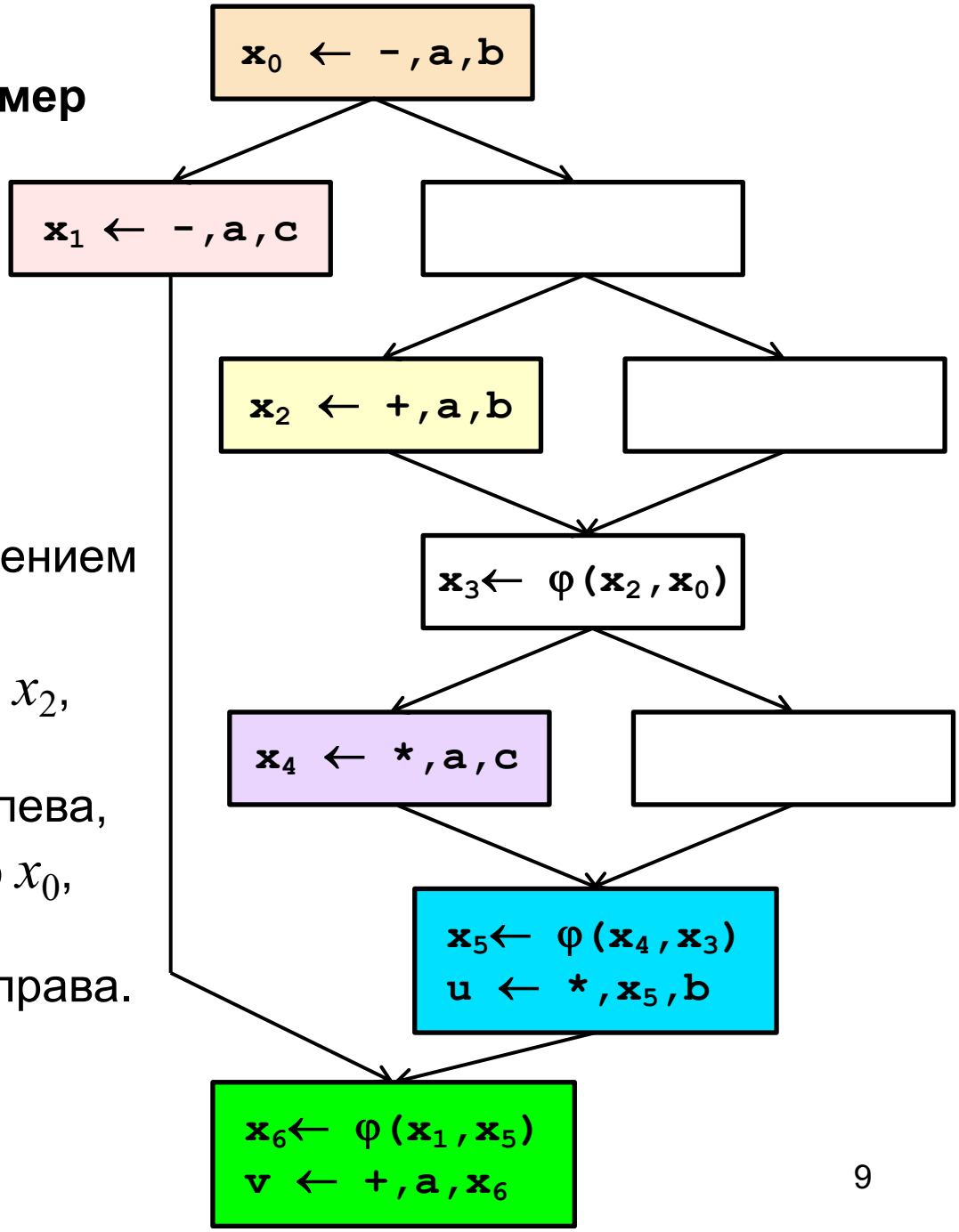
- Введем «функцию» объединения значений, или *φ-функцию*

- По определению

$$x_3 \leftarrow \varphi(x_2, x_0)$$

является новым определением переменной x:

  - значение x_3 равно x_2, когда управление попадает в блок слева,
  - значение x_3 равно x_0, когда управление попадает в блок справа.



6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции

- ◊ φ-функция определяет *SSA-имя* для значения своего аргумента, соответствующего ребру, по которому управление входит в блок.
- ◊ **При входе в базовый блок все его φ-функции выполняются одновременно и до любого другого оператора, определяя целевые *SSA*-имена.**

6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции. Пример

```
x =
y = …
while (x < 100){
   x = x + 1
   y = y + x
}
```

6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции. Пример

```
x =
y = …
while (x < 100){
   x = x + 1
   y = y + x
}
```

```
      x0 = …
      y0 = …
      if (x0 ≥ 100) goto next
loop: x1 = φ(x0, x2)
      y1 = φ(y0, y2)
      x2 = x1 + 1
      y2 = y1 + x2
      if (x2 < 100) goto loop
next: x3 = φ(x0, x2)
      y3 = φ(y0, y2)
```

6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции. Пример

```
x =
y = …
while (x < 100){
   x = x + 1
   y = y + x
}
```

```
      x0 = …
      y0 = …
      if (x0 ≥ 100) goto next
loop: x1 = φ(x0, x2)
      y1 = φ(y0, y2)
      x2 = x1 + 1
      y2 = y1 + x2
      if (x2 < 100) goto loop
next: x3 = φ(x0, x2)
      y3 = φ(y0, y2)
```

Каждая из φ-функций *объединяет* значения своих аргументов в новое значение, определением которого она является.

6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции. Пример

```
x =
y = …
while (x < 100){
   x = x + 1
   y = y + x
}
```

```
      x0 = …
      y0 = …
      if (x0 ≥ 100) goto next
loop: x1 = φ(x0, x2)
      y1 = φ(y0, y2)
      x2 = x1 + 1
      y2 = y1 + x2
      if (x2 < 100) goto loop
next: x3 = φ(x0, x2)
      y3 = φ(y0, y2)
```

Каждая из φ-функций *объединяет* значения своих аргументов в новое значение, определением которого она является.

До цикла –	x_0, y_0
На входе в цикл –	x_1, y_1
Внутри цикла –	x_2, y_2
После цикла –	x_3, y_3

6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции. Пример

```
x =
y = …
while (x < 100){
   x = x + 1
   y = y + x
}
```

```
      x0 = …
      y0 = …
      if (x0 ≥ 100) goto next
loop: x1 = φ(x0, x2)
      y1 = φ(y0, y2)
      x2 = x1 + 1
      y2 = y1 + x2
      if (x2 < 100) goto loop
next: x3 = φ(x0, x2)
      y3 = φ(y0, y2)
```

◊ **Затруднение**. Первый аргумент $\varphi(x_0, x_2)$ определяется в блоке, который предшествует циклу, второй аргумент определяется позже в блоке, содержащем $\varphi(x_0, x_2)$. Следовательно, при первом выполнении $\varphi(x_0, x_2)$ ее второй аргумент еще не определен.

6.1 SSA-форма

6.1.2. Определение φ-функции. Пример

```
x =
y = …
while (x < 100){
   x = x + 1
   y = y + x
}
```

```
      x0 = …
      y0 = …
      if (x0 ≥ 100) goto next
loop: x1 = φ(x0, x2)
      y1 = φ(y0, y2)
      x2 = x1 + 1
      y2 = y1 + x2
      if (x2 < 100) goto loop
next: x3 = φ(x0, x2)
      y3 = φ(y0, y2)
```

◊ **Выход из затруднения**: по определению любая φ-функция (а значит и $\varphi(x_0, x_2)$) **читает только один из своих аргументов**, а именно тот аргумент, который соответствует последнем пройденному ребру ГПУ.

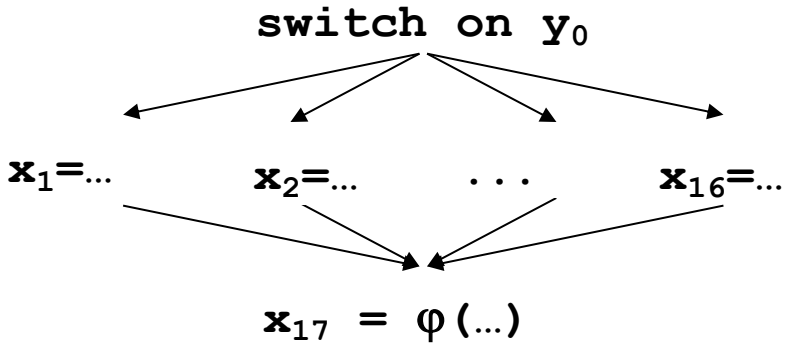
Поэтому φ-функция не прочитает неопределенного значения.

6.1 SSA-форма

6.1.3. Количество аргументов φ-функции

◊ По определению у ***φ*-функции может быть любое число аргументов**.

Например, на рисунке φ-функция, у которой 16 аргументов:



6.2 Построение SSA-формы

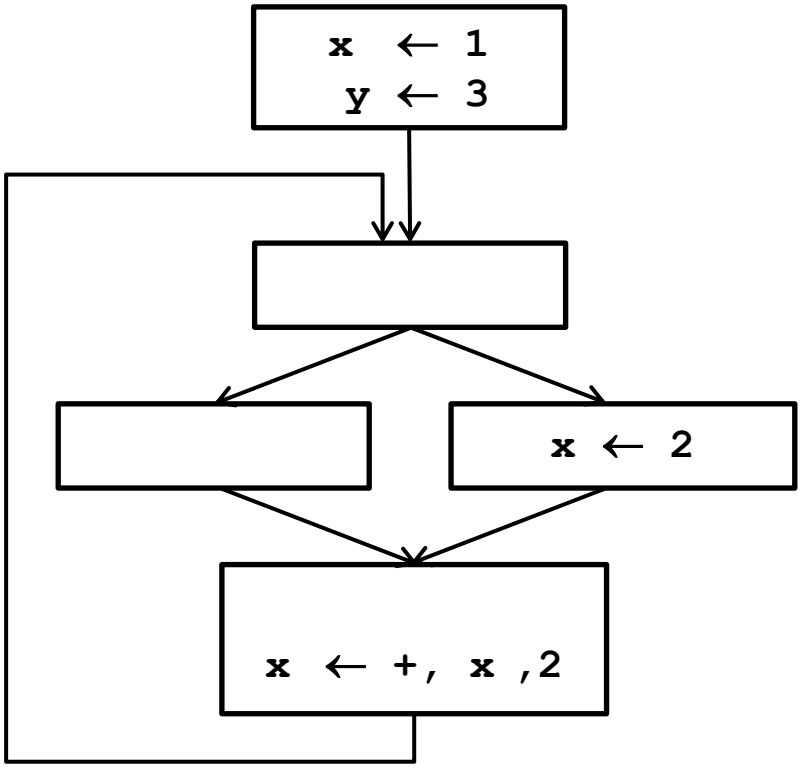
6.2.1. Постановка задачи

◊ Для преобразования процедуры в SSA-форму **компилятор** должен:

- вставить в точки сбора необходимые φ-функции для каждой переменной;
- переименовать переменные (в том числе и временные) таким образом, чтобы выполнялись следующие два правила:
  (1) каждое определение имеет индивидуальное имя; и
  (2) каждое использование ссылается на единственное определение.

6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения *SSA*-формы. Пример

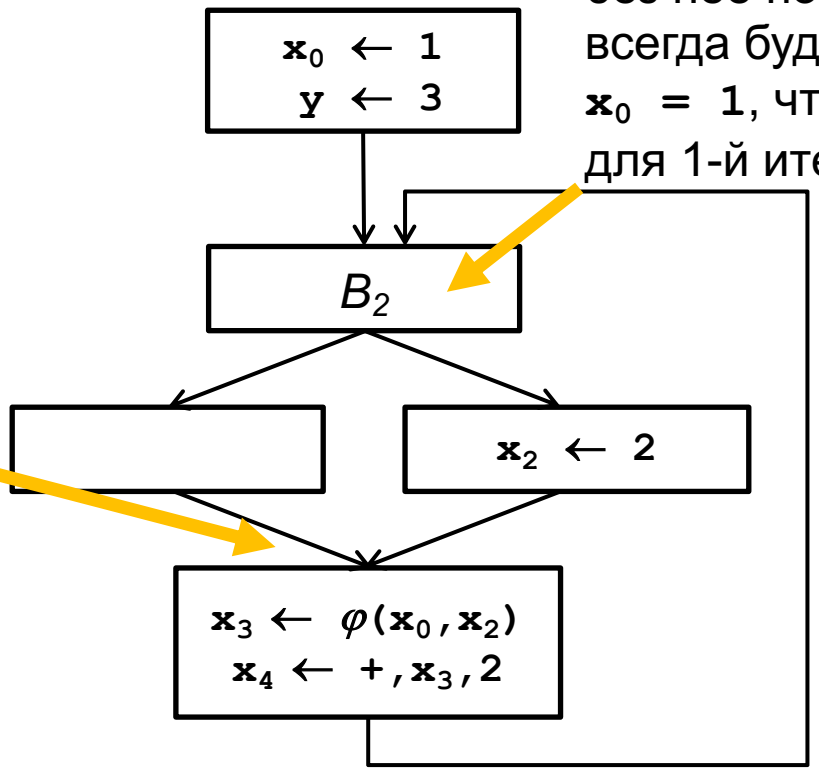


6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

(Неправильное решение)

Не хватает еще одной φ-функции от x_0 и x_4:
без нее по левой дуге всегда будет приходить $x_0 = 1$, что верно только для 1-й итерации цикла



Без φ(x_0, x_4) в B_2 по левой дуге всегда будет приходить $x_0 = 1$, и компилятор может подставить значение $x_0 = 1$ внутрь φ-функции, что приведет к генерации некорректного кода.

Как можно было избежать этой ошибки: при построении максимальной SSA-формы нужно вставлять φ-функции для ВСЕХ ГЛОБАЛЬНЫХ* переменных процедуры во ВСЕ точки сбора.

(*) Глобальные переменные – те, которые живы на границе базовых блоков

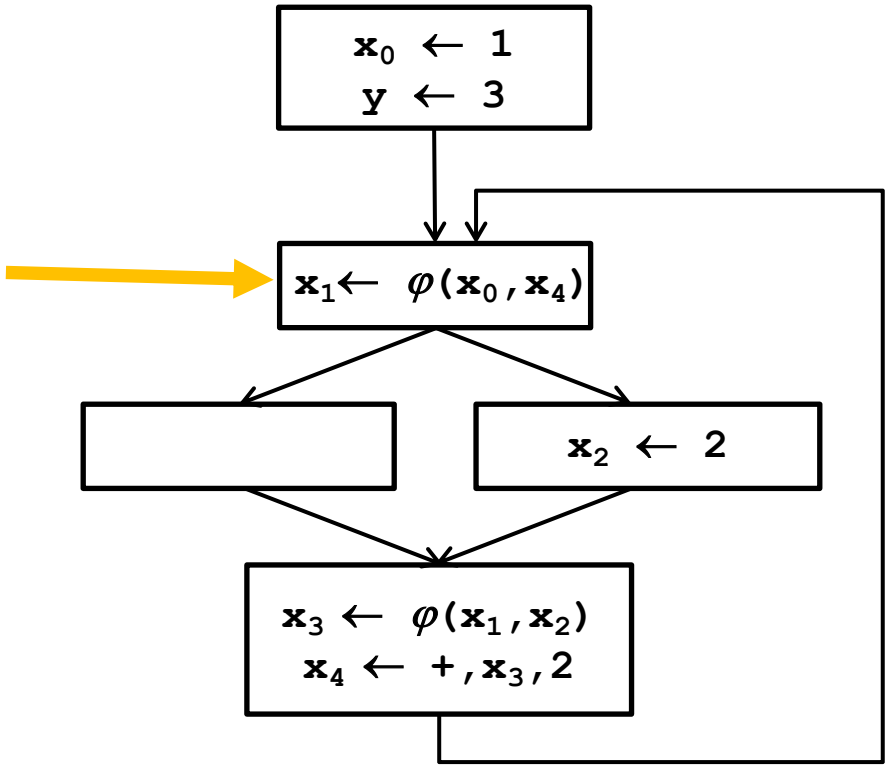
6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

Как избежать такой ошибки: при построении *максимальной* SSA-формы нужно вставлять φ-функции для ВСЕХ ГЛОБАЛЬНЫХ переменных процедуры во ВСЕ точки сбора.

Глобальные переменные – те переменные, которые живы на границе хотя бы одного из базовых блоков.

(Правильное решение)



«Глобальные» – для целей построения SSA-формы (а не в смысле языка программирования). Было бы не совсем корректно говорить, что глобальные переменные – это те, которые имеют определение и использование в разных блоках. Например, определение может находиться после использования в одном и том же блоке внутри цикла. Кроме того, возможны вырожденные случаи: «мертвые» определения в разных блоках (т.е. без последующего использования), или использование без предшествующего определения. Во всех этих случаях могут потребоваться φ-функции.

6.2 Построение SSA-формы

6.2.2. Базовый алгоритм построения SSA-формы

◊ **Вход**: программа в промежуточном представлении

◊ **Выход**: промежуточное представление программы в SSA-форме

◊ **Метод**: Выполнить следующие действия:

(1) $Вставить\ \varphi\text{-}функции$:

в начало каждого блока B, у которого $|Pred(B)| > 1$ вставить φ-функцию вида $y = \varphi(y, y, \ldots)$ для **каждого глобального** имени y, которое встречается в функции.

(Т.е. интервал жизни y должен пересекать границы базовых блоков).

Вставленная φ-функция должна иметь по одному аргументу для каждого $B' \in Pred(B)$:

Порядок вставляемых φ-функций несуществен.

6.2 Построение SSA-формы

6.2.2. Базовый алгоритм построения *SSA*-формы

◊ **Вход**: программа в промежуточном представлении

◊ **Выход**: промежуточное представление программы в *SSA*-форме

◊ **Метод**: Выполнить следующие действия:

(2) *Переименовать переменные*:

(a) вычислить достигающие определения; при этом только одно определение будет достигать любого использования:

это гарантируют вставленные φ-функции, которые тоже являются определениями;

(b) переименовать каждое использование (как основных, так и временных) переменных таким образом, чтобы новое имя соответствовало единственному определению, которое достигает его.

6.2 Построение SSA-формы

6.2.2. Базовый алгоритм построения SSA-формы

◊ **Вход**: программа в промежуточном представлении

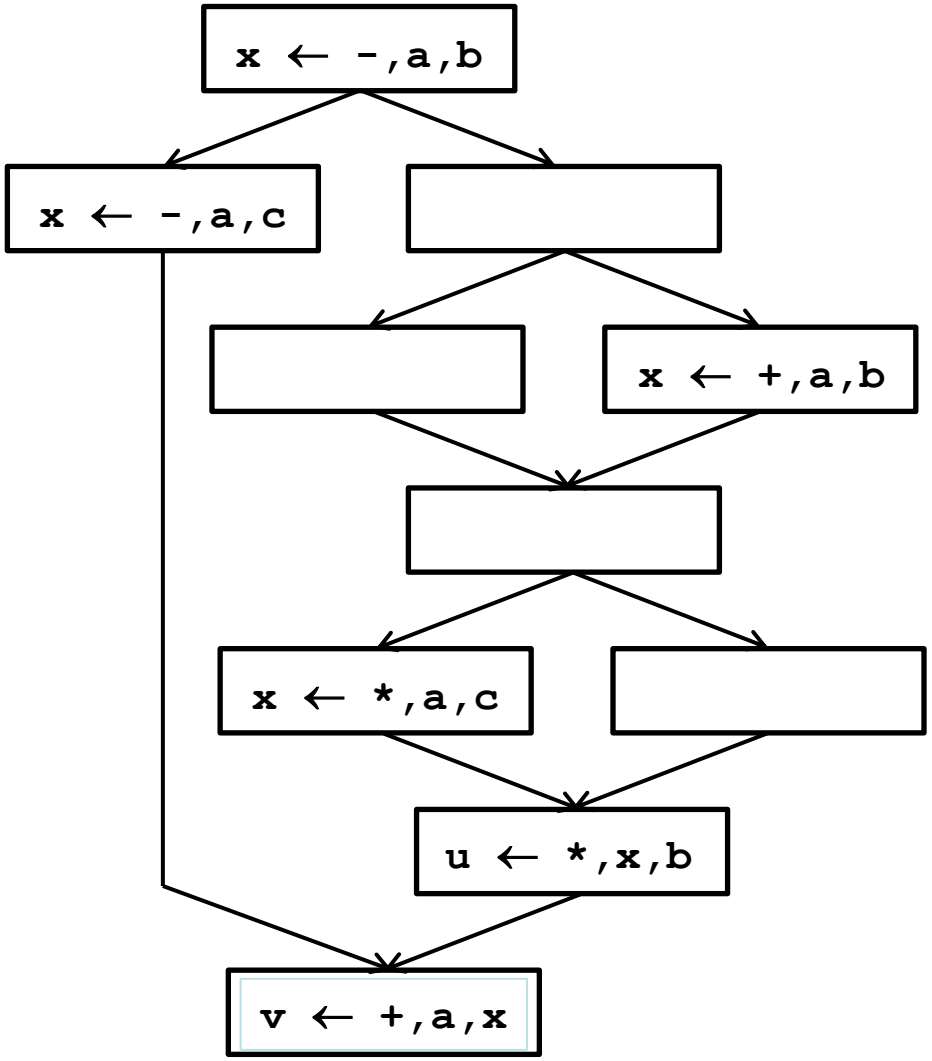
◊ **Выход**: промежуточное представление программы в SSA-форме

◊ **Метод**: Выполнить следующие действия:

(3) *Отсортировать определения*, достигающие каждой φ-функции, и для каждой φ-функции обеспечить соответствие имен ее аргументов путям, по которым определения этих аргументов достигают блока, содержащего указанную φ-функцию.

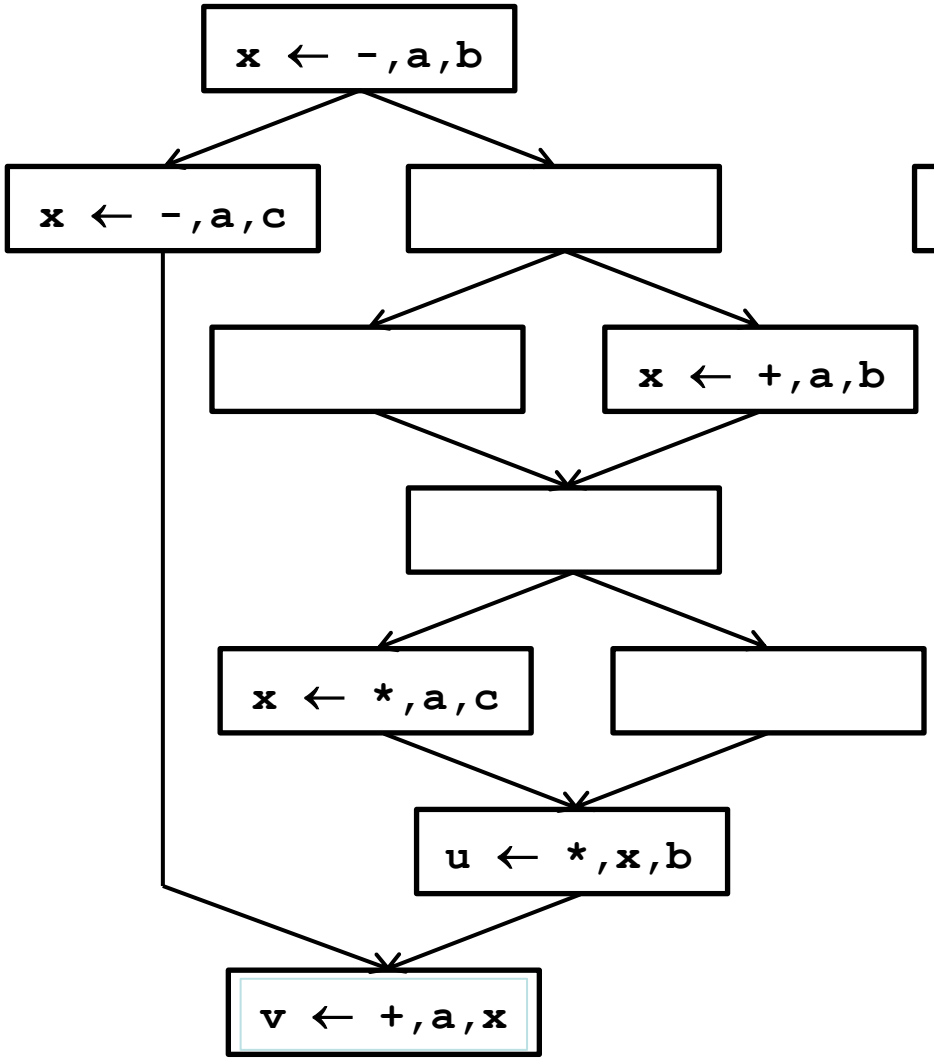
6.2 Построение SSA-формы

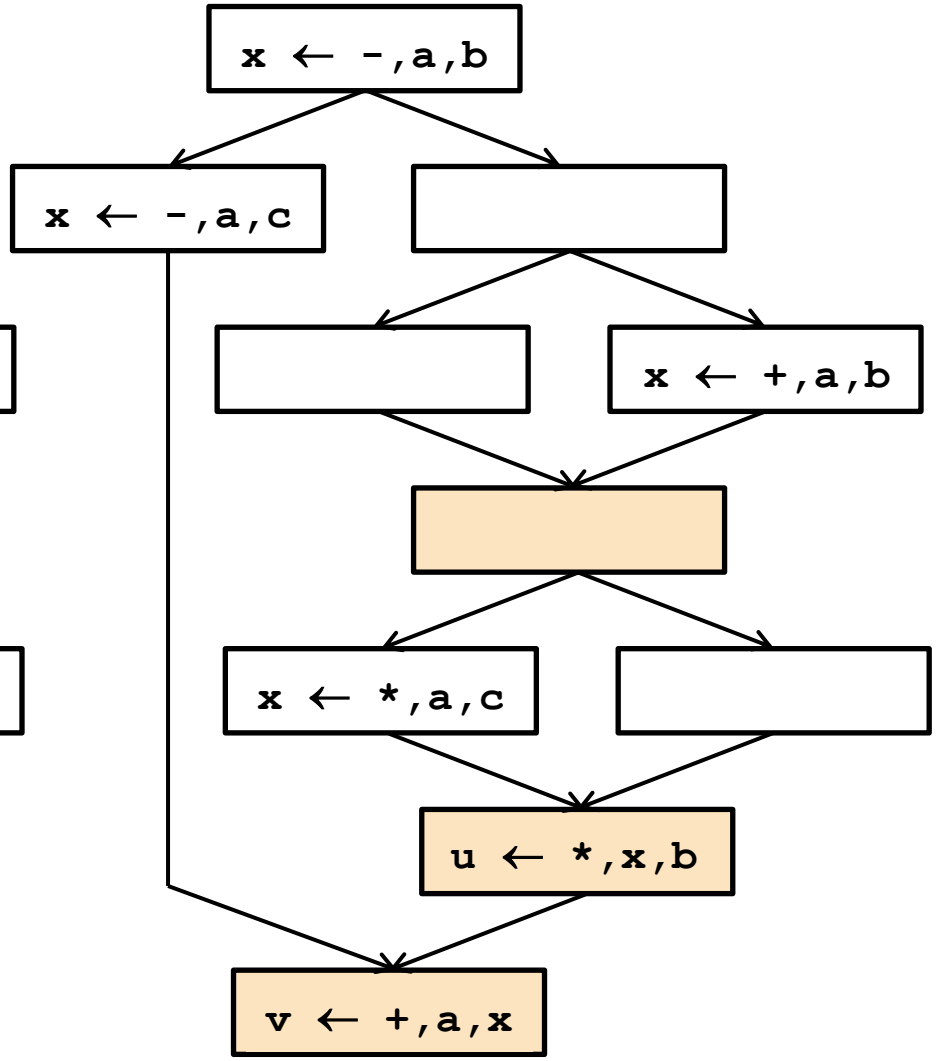
6.2.3. Базовый алгоритм построения *SSA*-формы. Пример



6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения *SSA*-формы. Пример

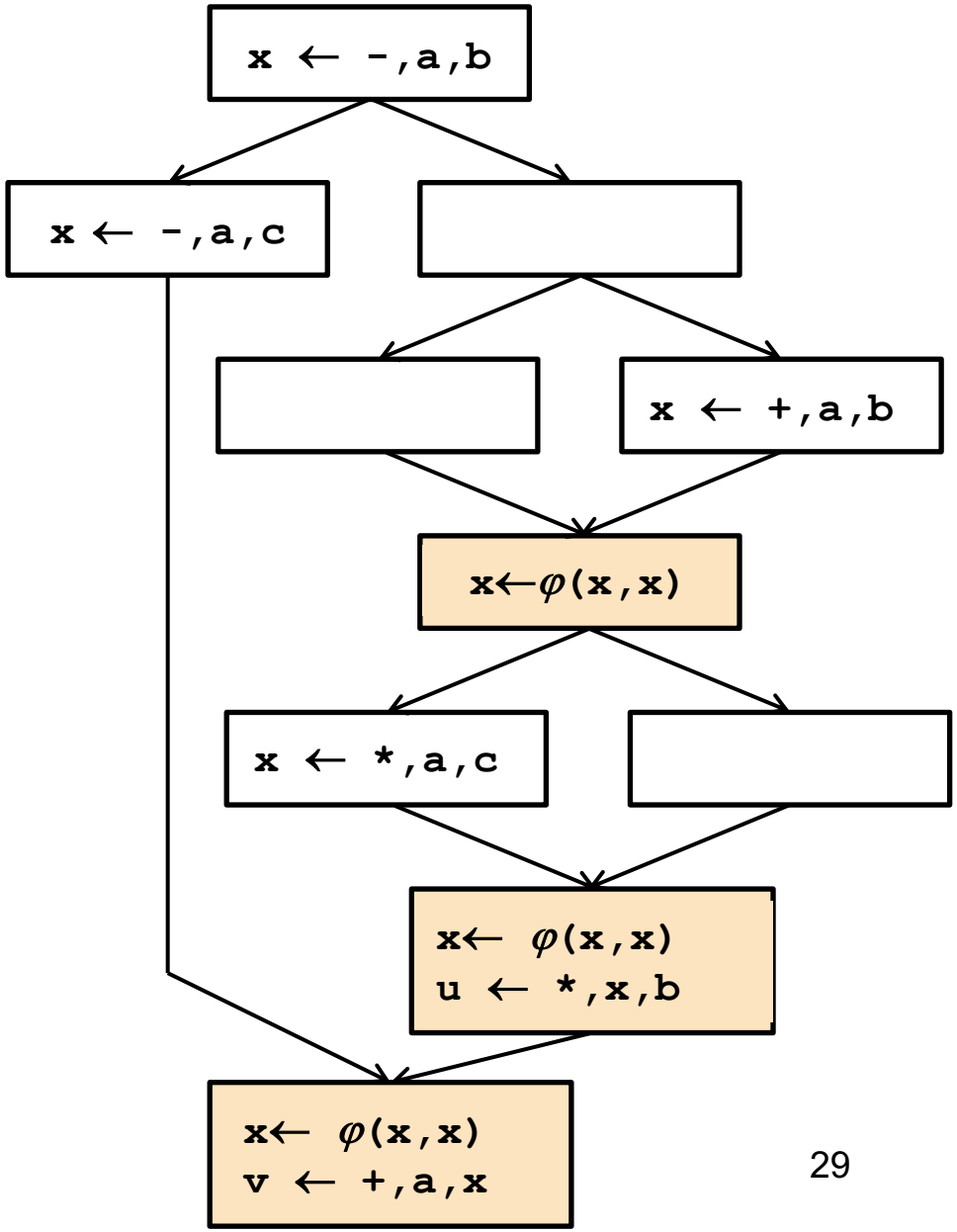




6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения *SSA*-формы. Пример

- ◊ Алгоритм вставил φ-функцию после каждой точки сбора ГПУ.
- ◊ Но это еще не SSA-форма, так как переменные еще не переименованы.



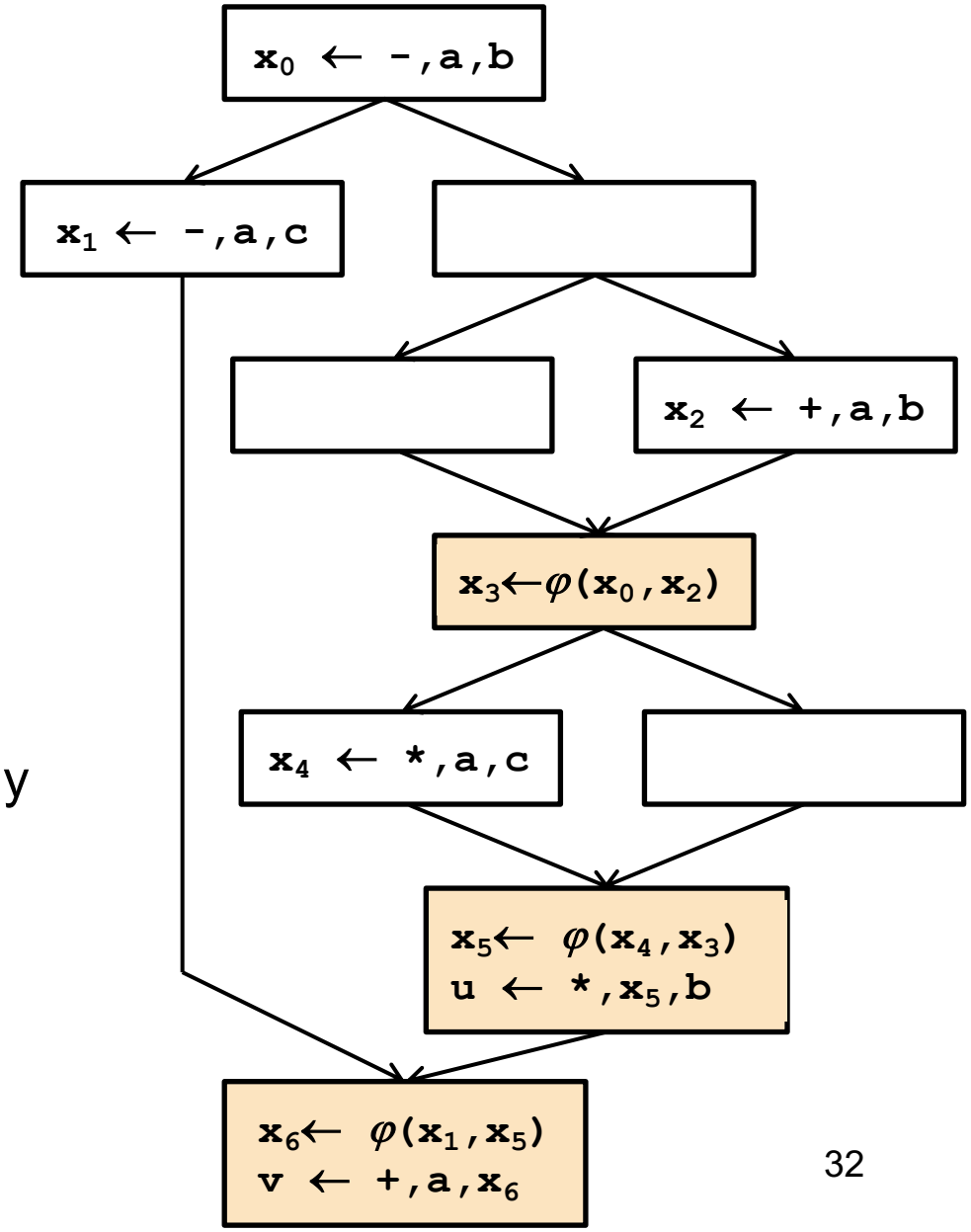
6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

- ◊ Алгоритм вставил φ-функцию в каждой точке сбора ГПУ.
- ◊ После преобразования процедуры в SSA-форму

  (1) внутри процедуры каждое определение создает уникальное имя;

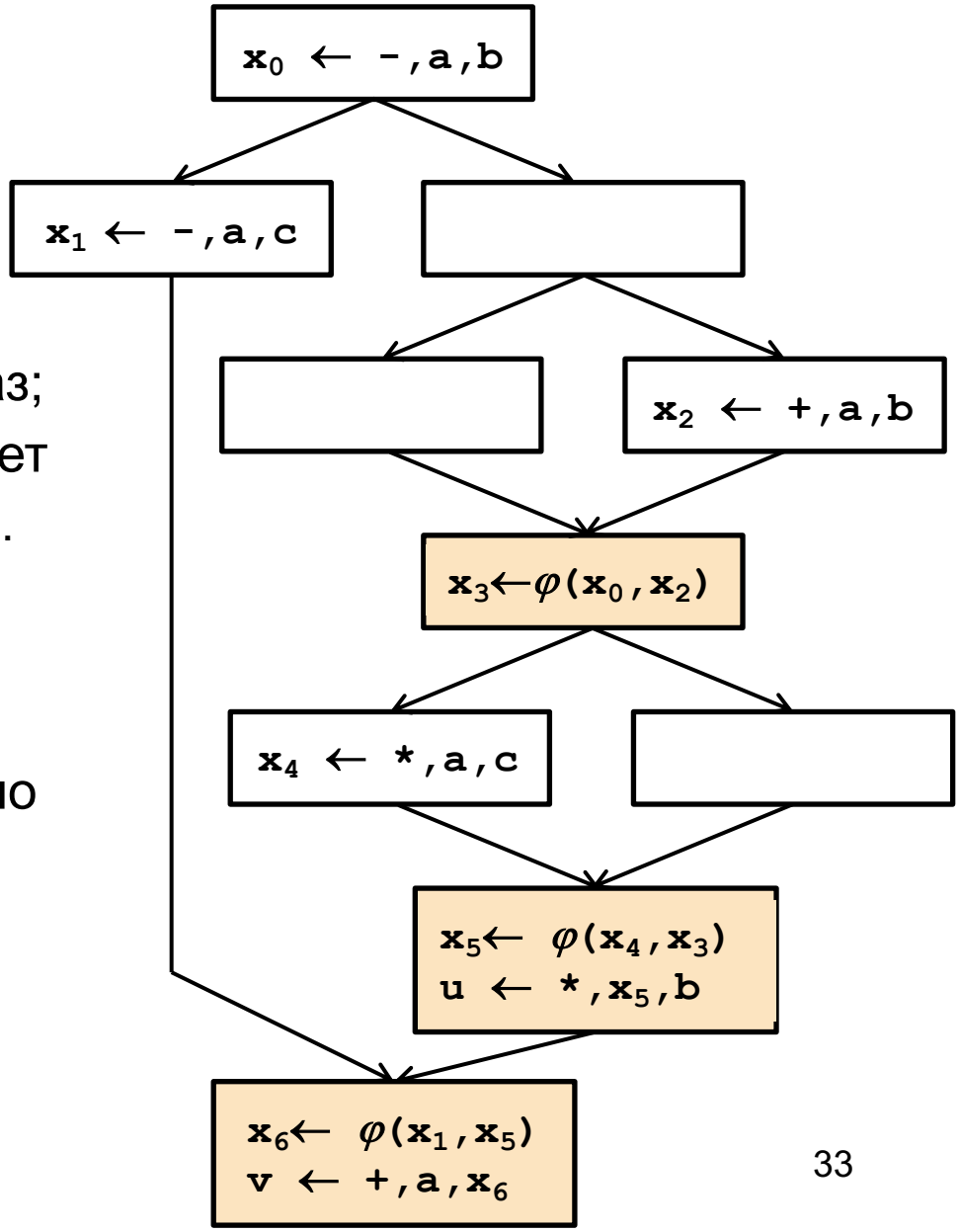
  (2) каждое использование обращается к единственному определению.



6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения *SSA*-формы. Пример

- Построенная *SSA-форма* корректна:
  - Каждая переменная определяется только один раз;
  - Каждое обращение использует имя отдельного определения.
- Построенная *SSA-форма* называется *максимальной SSA-формой,* так как она обычно содержит **намного больше** φ-функций, чем необходимо.



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

- ◊ По определению *частично усеченная SSA-форма* содержит меньше φ-функций, чем максимальная (но, к сожалению, как следует и из ее названия она **не всегда** содержит минимально возможное количество φ-функций).
- ◊ Частично-усеченная SSA-форма – один из вариантов «минимальной» SSA-формы, разработанных в конце прошлого века. Практика показала, что все эти формы дают для большей части программ одинаковые или незначительно отличающиеся результаты.
  Наиболее простой алгоритм построения у частично-усеченной SSA-формы.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

◊ По определению *частично усеченная SSA-форма* содержит меньше φ-функций, чем максимальная (но, к сожалению, как следует и из ее названия она **не всегда** содержит минимально возможн

Чтобы не всегда вставлять φ-функции необходимо **для каждой точки сбора** уметь выяснять, какие переменные нуждаются в φ-функциях, а какие нет.

◊ Частичн

«минима ошлого века. Практика показала, что все эти формы дают для большей части программ одинаковые или незначительно отличающиеся результаты.

Наиболее простой алгоритм построения у частично-усеченной SSA-формы.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

◊ По определению *частично усеченная SSA-форма* содержит меньше φ-функций, чем максимальная (но, к сожалению, как следует и из ее названия она **не всегда** содержит минимально возможн

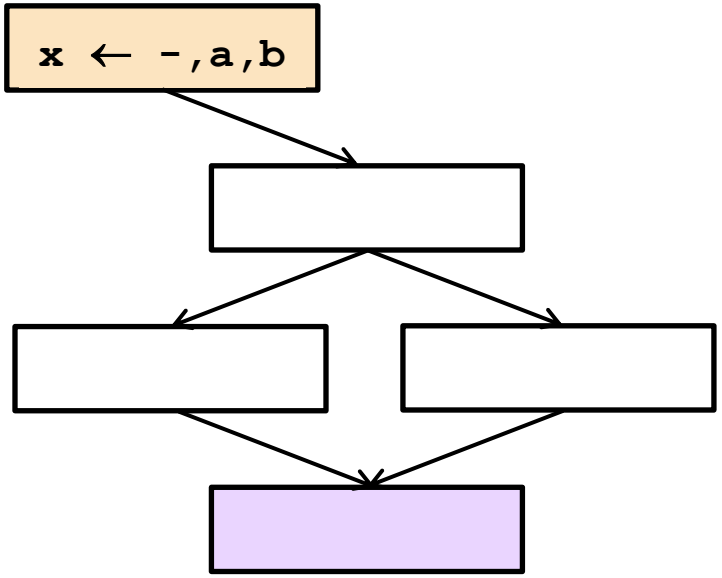
◊ Частичн

«минима ошлого века.
Практика й части
програм
результа
Наиболе енной
SSA-формы.

Чтобы не всегда вставлять φ-функции необходимо **для каждой точки сбора** уметь выяснять, какие переменные нуждаются в φ-функциях, а какие нет.
Или
для каждого определения переменной уметь находить множество всех точек сбора, которые нуждаются в φ-функциях для значения, порожденного этим определением.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

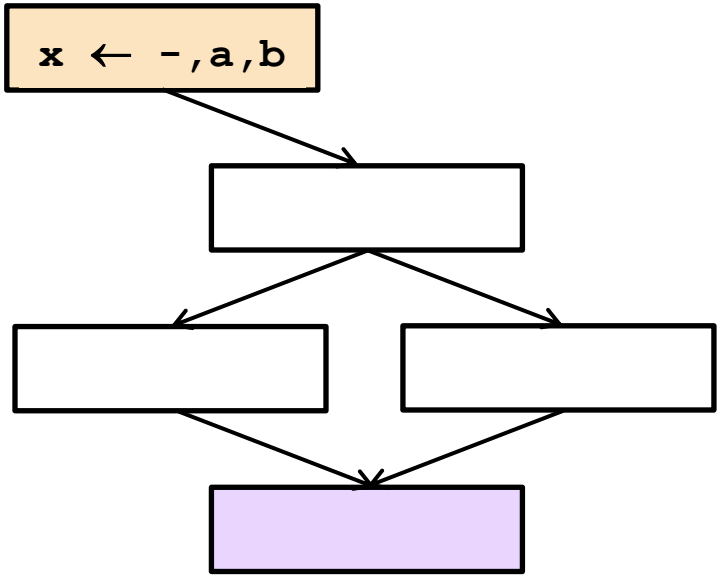
6.3.1. Постановка задачи



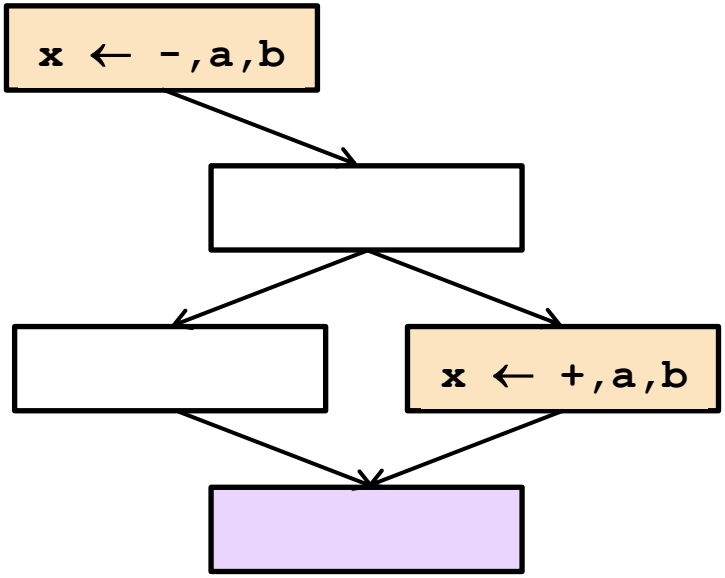
В лиловом блоке φ-функция для **x не нужна**, так как и слева, и справа приходит одно и то же значение **x**

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи



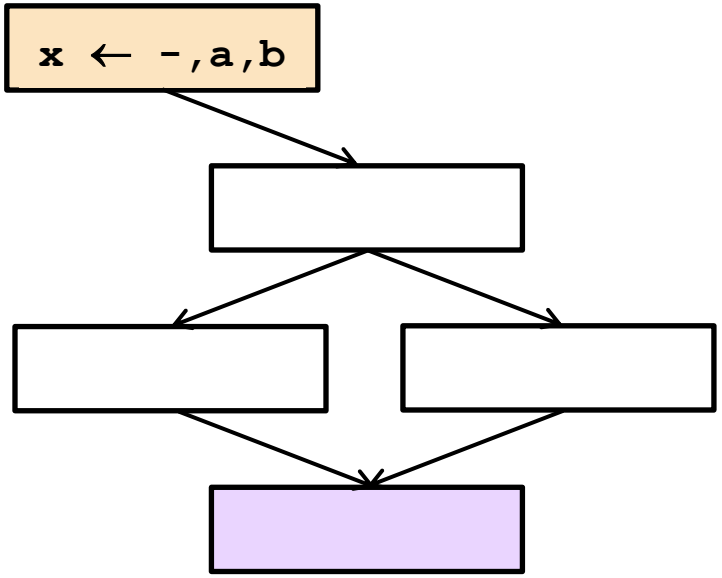
В лиловом блоке φ-функция для **x не нужна**, так как и слева, и справа приходит одно и то же значение **x**

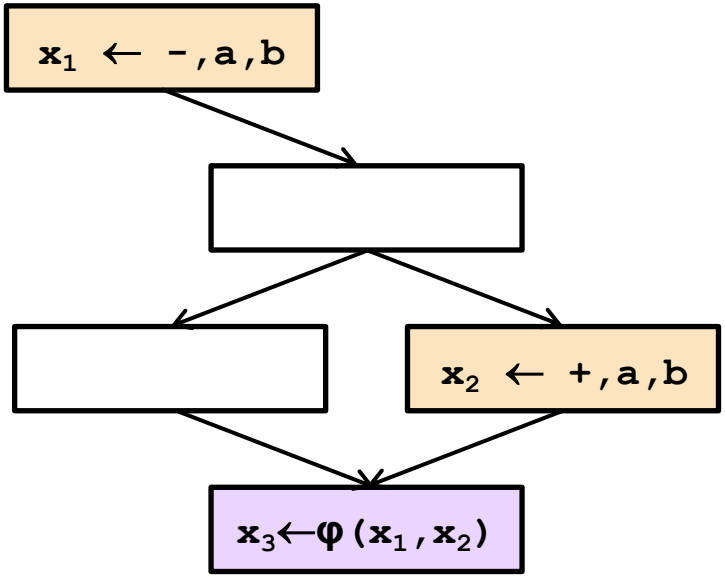


В лиловом блоке **нужна** φ-функция для **x**, так как справа появился блок, в котором вычисляется еще одно значение **x**

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи





В лиловом блоке φ-функция для **x не нужна**, так как и слева, и справа приходит одно и то же значение **x**

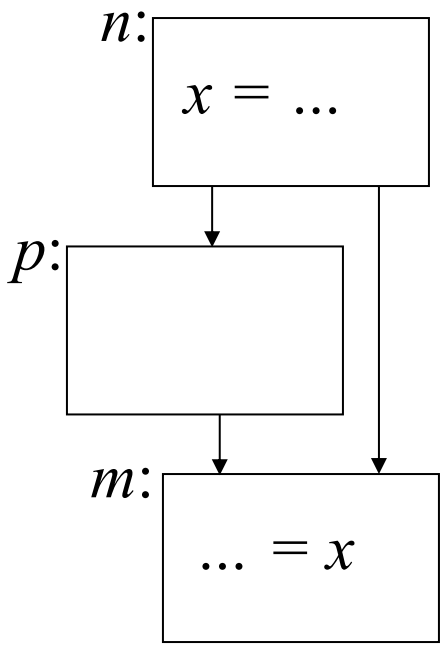
После переименования SSA-имена левого и правого аргументов φ-функции $\varphi(x, x)$ и ее результата должны быть такими, как показано на рисунке, так как значение x_1 поступает слева,
а значение x_2 – справа.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

◊ Пусть $Dom(m)$ – множество доминаторов узла m.

⟐ Если $n \in Dom(m)$, определение x_0 **в вершине *n*** не требует φ -функции в узле m, так как каждый путь, который достигает m, проходит через n.

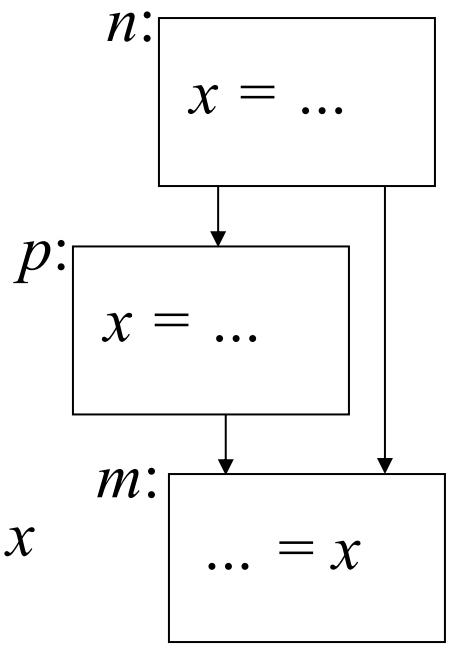


6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

◊ Пусть $Dom(m)$ – множество доминаторов узла m.

- Если $n \in Dom(m)$, определение x_0 **в вершине n** не требует φ -функции в узле m, так как каждый путь, который достигает m, проходит через n.
- Если $n \in Dom(m)$, единственным вариантом, при котором определение x_0 не достигнет узла m, является «вклинивание» еще одного определения x в некотором узле $p \notin Dom(m)$, расположенном между n и m.



При этом φ-функцию будет требовать не определение x в узле n, а его переопределение в узле p.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

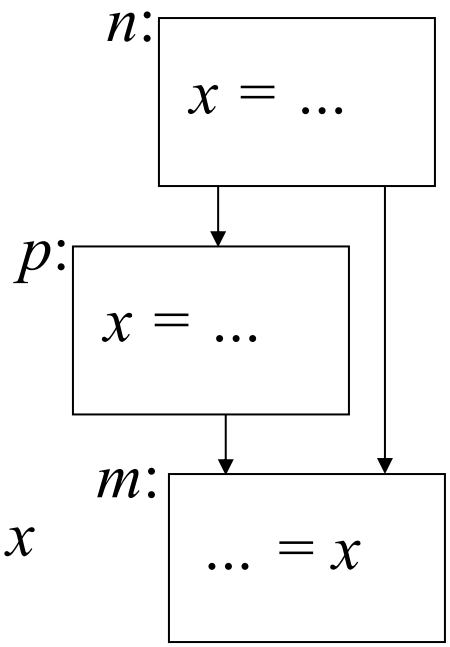
6.3.1. Постановка задачи

◊ Пусть $Dom(m)$ – множество доминаторов узла m.

Нетрудно заметить, что блок с меткой m – граница доминирования блока с меткой p.

◈ Если $n \in Dom(m)$, единственным вариантом, при котором определение x_0 не достигнет узла m, является «вклинивание» еще одного определения x в некотором узле $p \notin Dom(m)$, расположенном между n и m.

При этом φ-функцию будет требовать не определение x в узле n, а его переопределение в узле p.

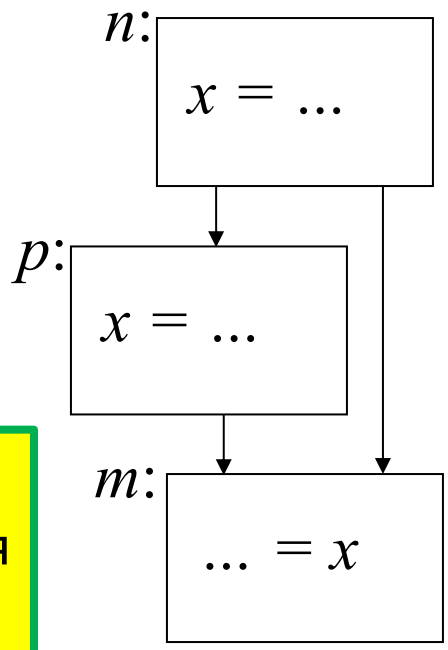


6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

◊ Пусть $Dom(m)$ – множество доминаторов узла m.

Нетрудно заметить,
что блок с меткой m – граница доминирования блока с меткой p.



◈ Если $n \in Dom(m)$, единственным вариантом, при котором определение x_0 достигает m, проходит через n.

Напоминание.
Границей доминирования $DF(n)$ узла n называется множество узлов m, удовлетворяющих условиям:

(1) n является доминатором предшественника p узла m: $p \in Pred(m)$ && $n \in Dom(p)$

(2) n не является строгим доминатором m:
$n \notin (Dom\,(m) - \{m\})$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

◊ Базовый алгоритм помещал по φ-функции для **каждой** глобальной переменной в начало **каждой** вершины сбора.

◊ Границы доминирования позволяют более точно определить, какие именно φ-функции необходимы в данной вершине.

Правило: Определение переменной x в базовом блоке B требует соответствующей φ-функции в каждой вершине из $DF(B)$.

При этом вставленная φ-функция становится новым определением x, так что могут потребоваться новые φ-функции.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

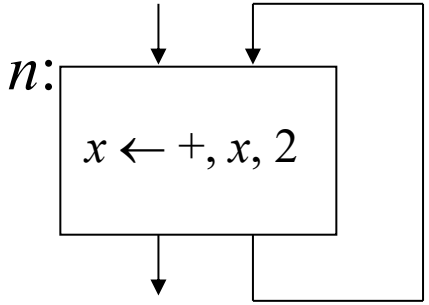
◊ Базовый алгоритм помещал по φ-функции для **каждой** глобальной переменной в начало **каждой** вершины сбора.

◊ Границы доминирования позволяют более точно определить, какие именно φ-функции необходимы в данной вершине.

Правило: Определение переменной x в базовом блоке B требует соответствующей φ-функции в каждой вершине из $DF(B)$.

При этом вставленная φ-функция становится новым определением x, так что могут потребоваться новые φ-функции.

◊ **Пример**. $DF(n) = \{n\}$



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

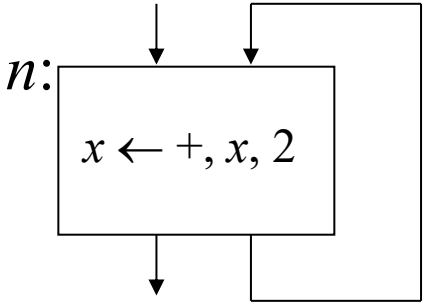
◊ Базовый алгоритм помещал по φ-функции для **каждой** глобальной переменной в начало **каждой** вершины сбора.

◊ Границы доминирования позволяют более точно определить, какие именно φ-функции необходимы в данной вершине.

Правило: Определение переменной x в базовом блоке B требует соответствующей φ-функции в каждой вершине из $DF(B)$.

!!! При этом вставленная φ-функция становится новым определением x, так что могут потребоваться новые φ-функции.

◊ **Пример**. $DF(n) = \{n\}$

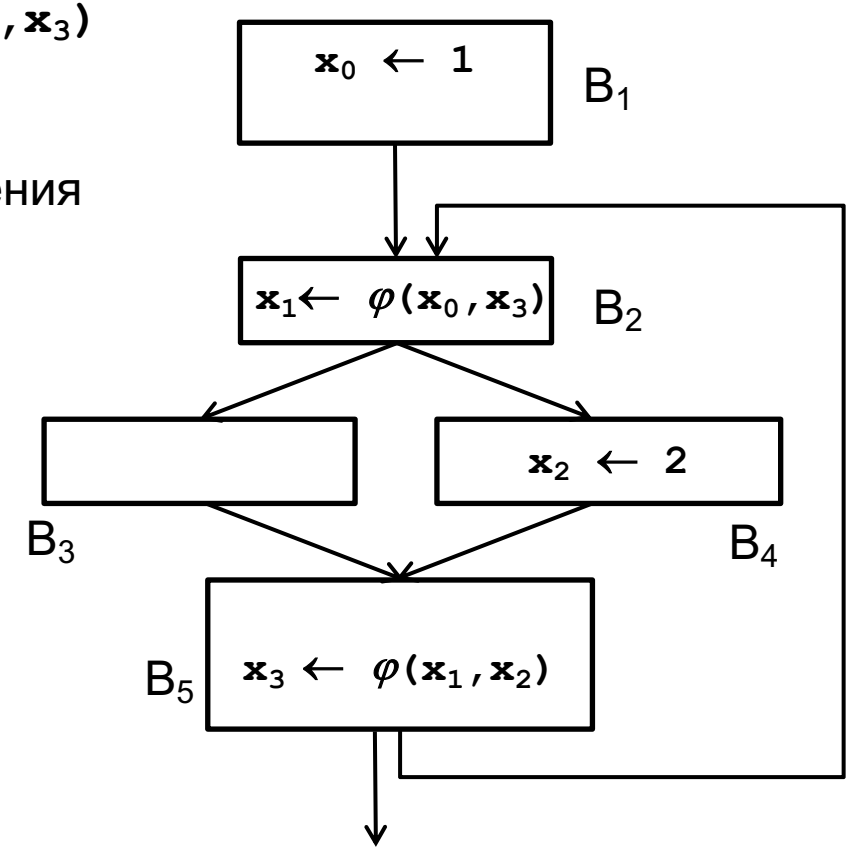


6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

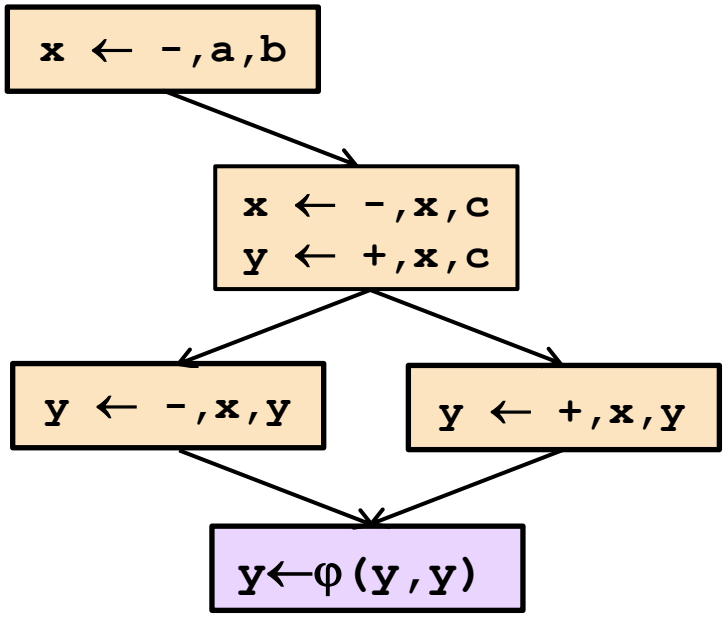
«При этом вставленная φ-функция становится новым определением x, так что могут потребоваться новые φ-функции.»

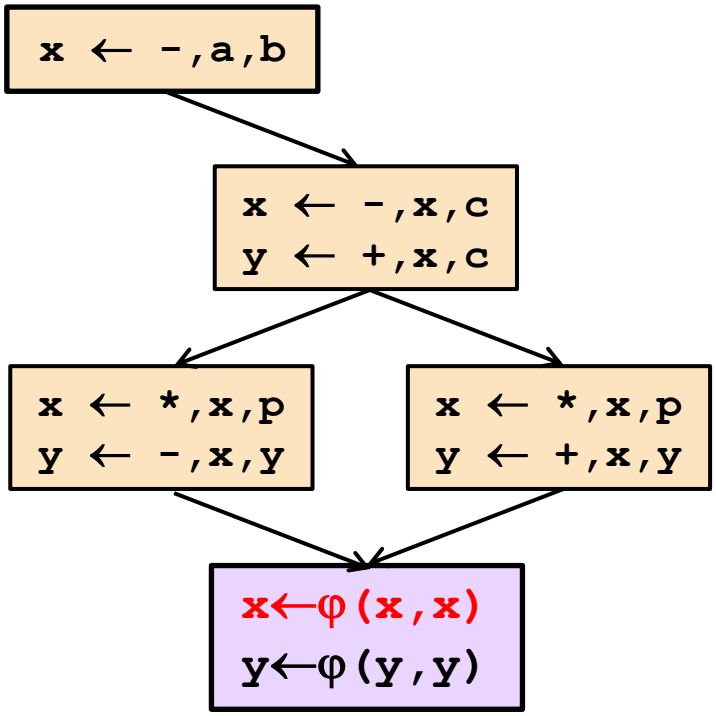
В данном примере φ-функция $x_1 \leftarrow \varphi(x_0, x_3)$ в B_2 появляется как раз потому, что только что добавленное определение $x_3 \leftarrow \varphi(x_1, x_2)$ в B_5 потребует добавления φ-функции в блок на своей границе доминирования (в B_2)



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи. Пример

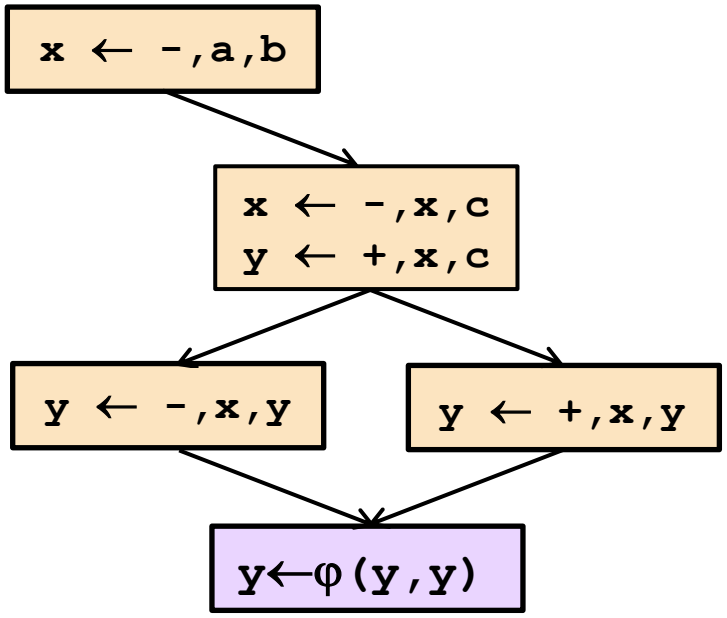


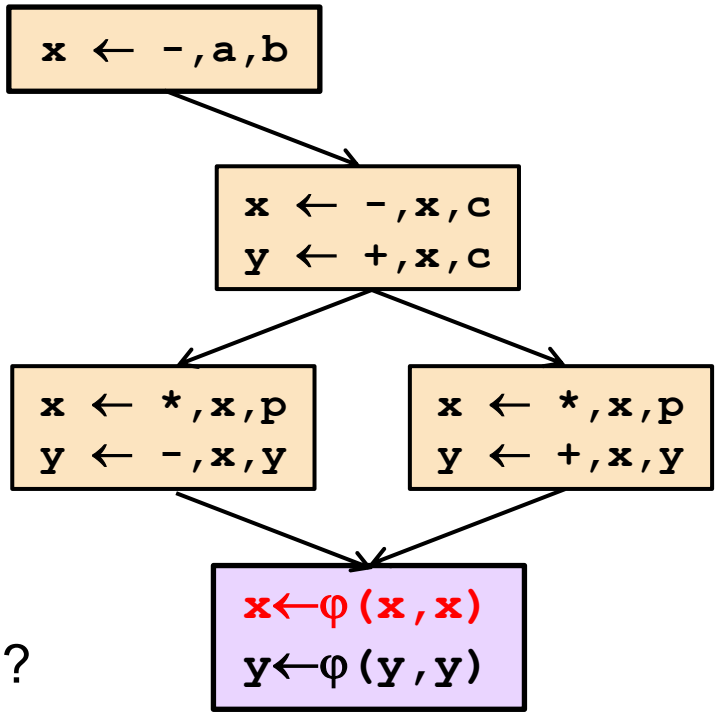


Какие φ-функции нужны в лиловом блоке?

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи. Пример





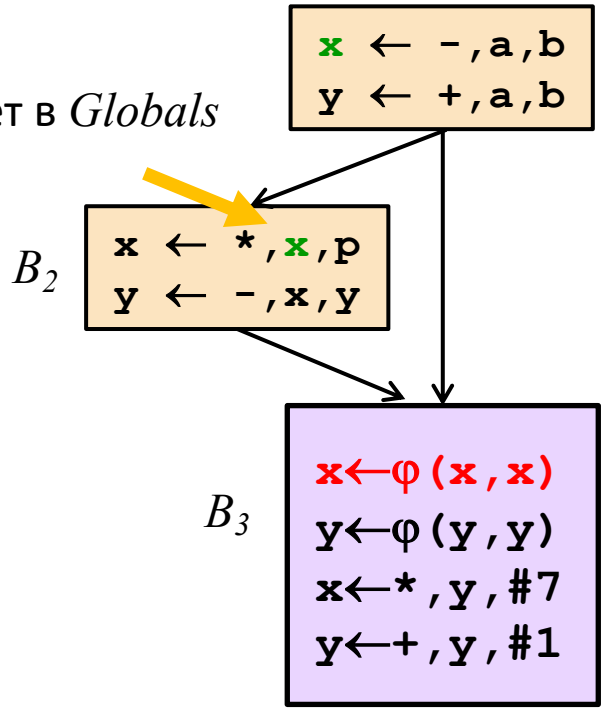
Какие φ-функции нужны в лиловом блоке?

В φ-функцию, выделенную красным цветом, и справа, и слева поступают одинаковые значения x. Но алгоритм построения SSA формы этого в общем случае не учитывает, да и ничего с этим поделать не сможет, т. к. у каждого нового определения должен быть свой номер, а при слиянии путей, на которых одна переменная доступна с разными номерами, обязана быть φ-функция. Разве что одинаковое выражение поднять в доминатор, но в задачи при построении SSA-формы это не входит.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2.1. *Частично-усеченная и усеченная SSA-формы*

x используется в блоке до определения, т.е. x попадет в $Globals$



До построения SSA, в B_3 переменная x не используется до переопределения, поэтому не может иметь живой φ-функции.

Усеченная форма: x, определяемая в блоке B_2, не жива за пределами блока, поэтому φ-функция (в B_3) для нее не требуется.
Но для того, чтобы это установить, нужно выполнить анализ живых переменных.

Частично-усеченная форма: Компромиссный вариант – не требует анализа живых переменных, φ-функции вставляются только для *глобальных имен*, т.е. имён, живых на границе какого-либо из базовых блоков.

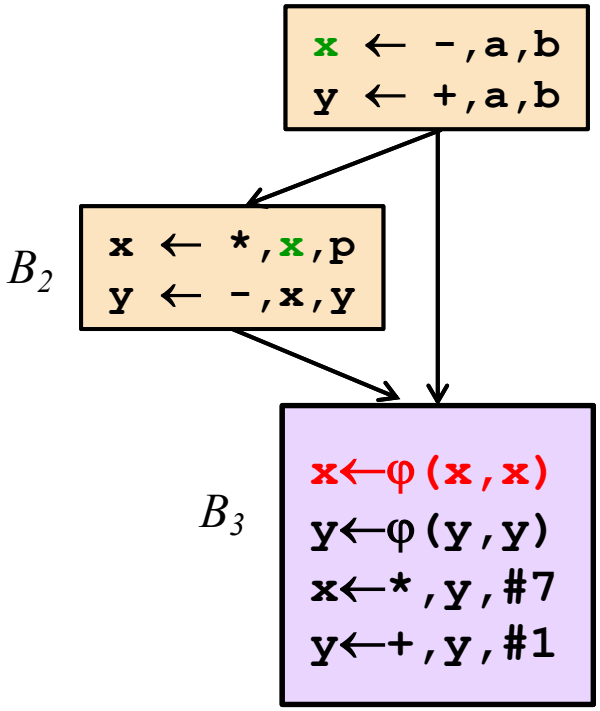
Но это не гарантирует, что φ-функция жива (т.к. переменная могла попасть в глобальные, т.к. была жива на границе какого-то другого блока, а не того, в котором вставляется φ-функция), и может приводить к появлению избыточных φ-функций (например, в B_3).

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

◊ φ-функция должна быть *живой*, т.е. живой должна быть переменная, которую эта φ-функция определяет. (пример на рисунке справа).

Отметим, что если выполнить анализ живых переменных до построения SSA, то $x, y \in def_{B3}$, а $y \in use_{B3}$ (на входе в блок x мертвая, а y живая)



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

◊ Переменная, которая не жива на границах всех базовых блоков, например, сначала определяется и затем используется в одном блоке (и только в нем), не может иметь живой φ-функции.

Поэтому φ-функции нужно вставлять только для *глобальных имен*, т.е. имен переменных, определение и использование которых находятся *в разных* базовых блоках (либо использование предшествует определению).

Этого, однако, не достаточно, чтобы предотвратить ситуацию с предыдущего слайда.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

- ◊ Перед размещением φ-функций вычисляется множество $Globals$ глобальных имен. При вычислении $Globals$ используется множество def_B, в которое добавляются переменные, определяемые в текущем блоке.
- ◊ Алгоритм вычисления множества $Globals$ попутно вычисляет для каждого базового блока B множество def_B и для каждой переменной $x \in Globals$ – множество $Blocks(x)$ базовых блоков B, в которых определяется x.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

◊ Итак, перед размещением φ-функций вычисляется множество глобальных имен $Globals$. При вычислении $Globals$ можно также использовать результаты анализа живых переменных (т.е. вместо отдельного построения def_B, можно использовать множество def, которое вычисляется в ходе анализа LV).

◊ Представленный алгоритм вычисления множества $Globals$ попутно сам вычисляет для каждого базового блока B множество def_B и для каждой переменной $x \in Globals$ – множество $Blocks(x)$ базовых блоков B, в которых определяется x.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

Алгоритм построения множеств *Globals* и *Blocks*(x)

◊ **Вход**: ГПУ

◊ **Выход**: множество $Globals$,
множества $Blocks(x)$ для каждой переменной x – блоки, в которых определяется x
множества def_B для каждого базового блока B – переменные, которые определяются в B.

◊ **Метод**: Выполнить следующие действия:

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

Алгоритм построения множеств *Globals* и *Blocks*(*x*)

$Globals = \varnothing$;
for each *variable* x **do** $Blocks(x) = \varnothing$;
for each *block* B **do {**
    $def_B = \varnothing$;
    for each *instruction* $i \in B$ **do {**
        // пусть команда i имеет вид: $x \leftarrow op, y, z$
        if $y \notin def_B$ **then** $Globals = Globals \cup \{y\}$;
        if $z \notin def_B$ **then** $Globals = Globals \cup \{z\}$;
        // $y, z \notin def_B$ – если они определены в другом блоке
        $def_B = def_B \cup \{x\}$;
        $Blocks(x) = Blocks(x) \cup \{B\}$
    }
}

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

Алгоритм построения множеств *Globals* и *Blocks*(*x*)

$Globals = \varnothing$;
for each *variable* x **do**
for each *block* B **do {**
$def_B = \varnothing$;
for each *instruction* $i \in B$ **do {**
// пусть команда i имеет вид: $x \leftarrow op, y, z$
if $y \notin def_B$ **then** $Globals = Globals \cup \{y\}$;
if $z \notin def_B$ **then** $Globals = Globals \cup \{z\}$;
// $y, z \notin def_B$ – если они определены в другом блоке
$def_B = def_B \cup \{x\}$;
$Blocks(x) = Blocks(x) \cup \{B\}$
}
}

Аналогично нужно обрабатывать использования переменных и в других операциях, например, в условном операторе, или при вызове функций:

```
if (y < z) { }
foo(y, z);
```

Другие определения обрабатываются так же, как левая часть присваивания (например, объявление параметра):

```
param_decl x
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

Алгоритм размещения φ-функций

- **Вход**: исходный ГПУ
- **Выход**: преобразованный ГПУ

```
for each name x ∈ Globals do {
    WorkList = Blocks(x);
    for each block B ∈ WorkList do {
        for each block D ∈ DF(B) do {
            if (D не содержит φ-функции для x) {
                Вставить φ-функцию для x в D;
                WorkList = WorkList ∪ {D};
            }
        }
        WorkList = WorkList – {B};
    }
}
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

Алгоритм размещения φ-функций

- **Вход**: исходный ГПУ
- **Выход**: преобразованный ГПУ

```
for each name x ∈ Globals do {
    WorkList = Blocks(x);
    for each block B ∈ WorkList do {
        for each block D ∈ DF(B) do {
            if (D не содержит φ-функции для x) {
                Вставить φ-функцию для x в D;
                WorkList = WorkList ∪ {D};
            }
        }
        WorkList = WorkList – {B};
    }
}
```

Чтобы учесть новое определение x, реализуемое вставленной φ-функцией (!!!)

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ-функций

◊ **Замечание 1**. Для каждого блока $B \in WorkList$ алгоритм вставляет φ-функцию в начало каждого блока $D \in DF(B)$.

Порядок φ-функций роли не играет.

После вставки φ-функции для x в блок D алгоритм добавляет D в $WorkList$, чтобы в дальнейшем учесть новое определение x в блоке D.

6.3.2. Размещение φ-функций

◊ **Замечание 2**. Для улучшения эффективности алгоритма необходимо избегать дублирования:

рассматриваемый блок может входить в состав границ доминирования нескольких блоков, входящих в *WorkList*;

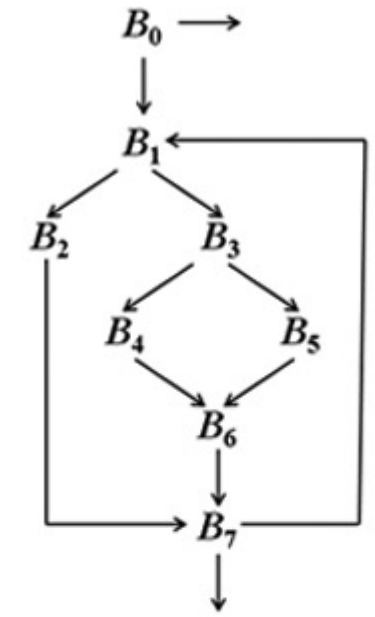
чтобы избежать вставления дублирующих φ-функций для переменной x, можно использовать множество блоков, которые уже содержат φ-функции для x, что быстрее, чем проверять каждый раз, какие φ-функции включены.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

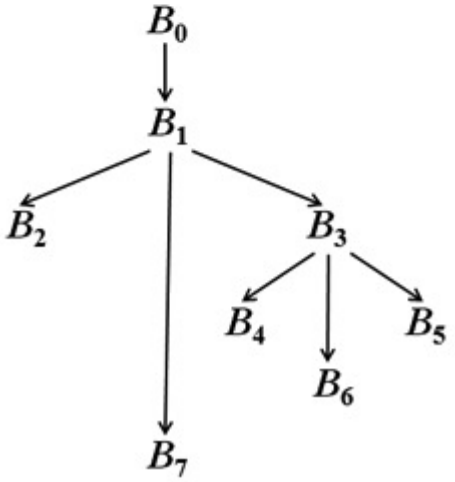
6.3.3. Размещение φ-функций. Пример.

B_0	i ← 1	B_5	c ←
B_1	a ← b ←	B_3	a ← d ←
B_2	b ← c ← d ←	B_7	y ← +, a, b z ← +, c, d i ← +, i, 1
B_6	b ←	B_4	d ←

Граф потока управления



Дерево доминаторов



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.3. Размещение φ-функций. Пример.

◊ Сначала вычисляются множества *Globals* и *Blocks(x)*:

$Globals = \{a, b, c, d, i\}$.

Множества $Blocks(x)$ представлены в таблице:

a	b	c	d	i
$\{B_1, B_3\}$	$\{B_1, B_2, B_6\}$	$\{B_2, B_5\}$	$\{B_2, B_3, B_4\}$	$\{B_0, B_7\}$

◊ Алгоритму размещения φ-функций потребуются также уже вычисленные границы доминирования:

n	0	1	2	3	4	5	6	7
$DF(B_n)$	$\varnothing$	$\{B_1\}$	$\{B_7\}$	$\{B_7\}$	$\{B_6\}$	$\{B_6\}$	$\{B_7\}$	$\{B_1\}$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.3. Размещение φ-функций. Пример.

◊ Применяем алгоритм размещения φ-функций.

Берем первую переменную из $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, т.е. a: $Blocks(a) = \{B_1, B_3\}$, так что алгоритм должен вставить φ-функцию для a в каждый блок из границ доминирования $DF(B_1) = \{B_1\}$ и $DF(B_3) = \{B_7\}$.

Так, вставив φ-функцию для a в B_7, получим новое определение a – φ-функцию, вставленную в B_7. Следовательно, необходимо включить B_7 в $WorkList$ и вставить φ-функцию для a в каждый блок из $DF(B_7) = \{B_1\}$. Но B_1 уже имеется в $WorkList$, так что $DF(B_7)$ не добавляется к $WorkList$.

x	a	b	c	d	i
Insert $\varphi(x)$	$\{B_7, B_1\}$	$\{B_7, B_1\}$	$\{B_7, B_1, B_6\}$	$\{B_7, B_1, B_6\}$	$\{B_1\}$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.3. Размещение φ-функций. Пример.

B_0 `i ← 1`	

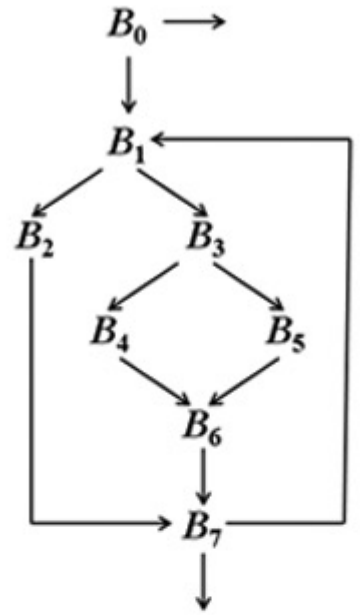
B_1 `a ← φ(a,a)`
`b ← φ(b,b)`
`c ← φ(c,c)`
`d ← φ(d,d)`
`i ← φ(i,i)`
`a ←`
`b ←`
	B_7 `a ← φ(a,a)`
	`b ← φ(b,b)`
	`c ← φ(c,c)`
	`d ← φ(d,d)`
	`y ← +, a, b`
	`z ← +, c, d`
	`i ← +, i, 1`

B_2 `b ←`
`c ←`
`d ←`
	B_3 `a ←`
	`d ←`

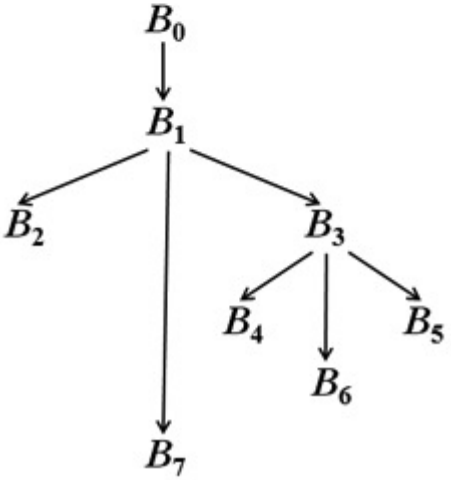
B_4 `d ←`	B_6 `c ← φ(c,c)`
	`d ← φ(d,d)`
	`b ←`

B_5 `c ←`	

Граф потока управления



Дерево доминаторов



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

Алгоритм

- ◊ **Вход**: программа с размещенными φ-функциями
- ◊ **Выход**: программа, в которой каждой переменной сопоставлено ее *SSA-имя*.
- ◊ **Метод**: Сначала (в основном алгоритме) инициализируются стеки и счетчики, после чего из корня дерева доминаторов n_0 вызывается рекурсивная функция *Rename*.

  Rename обрабатывает блок, рекурсивно вызывая его последователей по дереву доминаторов.

  Закончив обрабатывать очередной блок, *Rename* выталкивает из стеков все имена, помещенные в них во время обработки блока.

  Функция *NewName*, манипулируя со счетчиками и стеками, в случае необходимости создает новые имена.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

Алгоритм

- Основной алгоритм:

```
for each i ∈ Globals do {
        counter[i] = 0;
        stack[i] = ∅;
};
Rename(n0);
```

- Функция **NewName**:

```
NewName(n) { // n – имя переменной
        i = counter[n];
        counter[n] += 1;
        Push ni onto stack[n];
                return ni
}
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы
6.3.7. Переименование переменных.

Функция $Rename(B)$:

```
for each φ-function ∈ B: x = φ(…) do
     rename x as NewName(x);
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do{
     rewrite y as top(stack[y]);
     rewrite z as top(stack[z]);
     rewrite x as NewName(x);
}
for each successor of B in the flowgraph do
     fill in φ-function parameters;
for each successor S of B in the
     dominator tree do Rename(S)
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do
          Pop(stack[x]);
for each φ-function ∈ B: x = φ(…)do
          Pop(stack[x]);
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы
6.3.7. Переименование переменных.

Функция $Rename(B)$:

```
for each φ-function ∈ B: x = φ(…) do
     rename x as NewName(x);
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do{
     rewrite y as top(stac
     rewrite z as top(stac
     rewrite x as NewName(
}
for each successor of B in the flowgraph do
     fill in φ-function parameters;
for each successor S of B in the
     dominator tree do Rename(S)
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do
          Pop(stack[x]);
for each φ-function ∈ B: x = φ(…)do
          Pop(stack[x]);
```

```
NewName(n) {
  i = counter[n];
  counter[n] += 1;
    Push n_i onto stack[n];
  return n_i
}
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы
6.3.7. Переименование переменных.

Функция $Rename(B)$:

```
for each φ-function ∈ B: x = φ(…) do
     rename x as NewName(x);
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do{
     rewrite y as top(stac
     rewrite z as top(stac
     rewrite x as NewName(
}
for each successor of B in the flowgraph do
     fill in φ-function parameters;
for each successor S of B in the
     dominator tree do Rename(S)
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do
          Pop(stack[x]);
```

```
NewName(n) {
  i = counter[n];
  counter[n] += 1;
    Push n_i onto stack[n];
  return n_i
}
```

Типичная ошибка при выполнении Pop(stack[x]) – заодно уменьшить также и counter[x]. Этого делать не нужно!!!

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы
6.3.7. Переименование переменных.

Функция $Rename(B)$:

```
for each φ-fun
     rename x
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do{
     rewrite y as top(stack[y]);
     rewrite z as top(stack[z]);
     rewrite x as NewName(x);
}
for each succe                              o
     fill in φ
for each successor S of B in the
     dominator tree do Rename(S)
for each instruction ∈ B: x ← op, y, z do
          Pop(stack[x]);
for each φ-function ∈ B: x = φ(…)do
          Pop(stack[x]);
```

Аналогично нужно обрабатывать использования переменных и в других операциях, например, в условном операторе, или при вызове функций:

```
if (y < z) { }
foo(y, z);
```

Другие определения обрабатываются так же, как левая часть присваивания (например, объявление параметра):

```
param_decl x
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

Применим алгоритм переименования к рассматриваемому примеру в предположении, что на входе в блок B_0 определены имена a_0, b_0, c_0, d_0.

B_0 `i ← 1`	

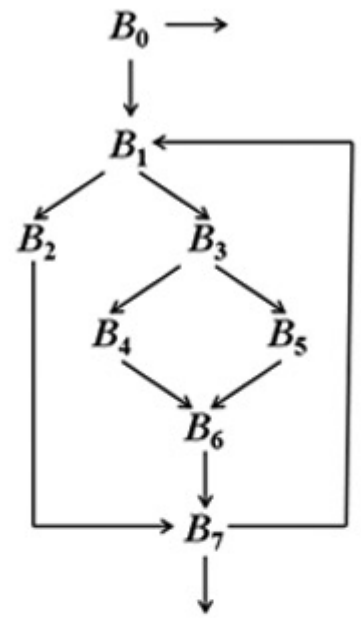
B_1 `a ← φ(a,a)`
`b ← φ(b,b)`
`c ← φ(c,c)`
`d ← φ(d,d)`
`i ← φ(i,i)`
`a ←`
`b ←`
	B_7 `a ← φ(a,a)`
	`b ← φ(b,b)`
	`c ← φ(c,c)`
	`d ← φ(d,d)`
	`y ← +, a, b`
	`z ← +, c, d`
	`i ← +, i, 1`

B_2 `b ←`
`c ←`
`d ←`
	B_3 `a ←`
	`d ←`

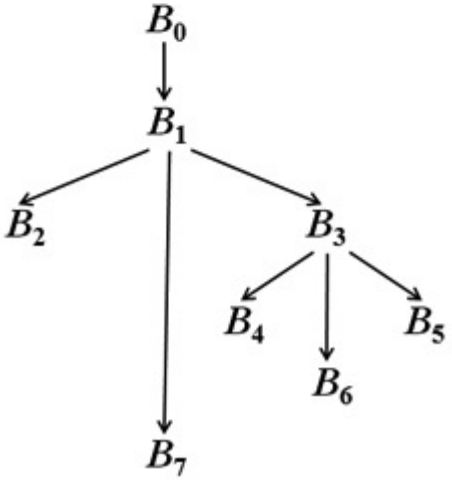
B_4 `d ←`	B_6 `c ← φ(c,c)`
	`d ← φ(d,d)`
	`b ←`

B_5 `c ←`	

Граф потока управления



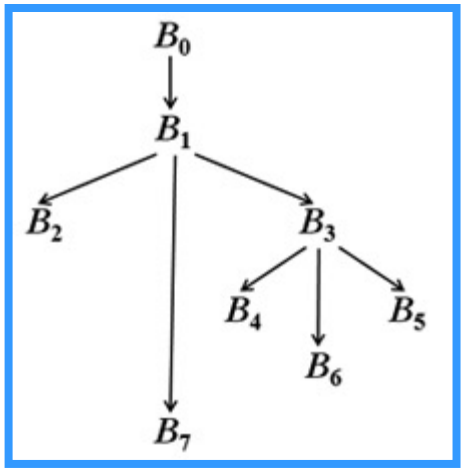
Дерево доминаторов



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

- Корнем обрабатываемой части дерева доминаторов является блок B_0. Поэтому «***Основной алгоритм***», обнулив счетчики и опустошив стеки для переменных из множества $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, сделает вызов $\boldsymbol{Rename(B_0)}$.



- Порядок обработки базовых блоков определяется деревом доминаторов (обход в глубину):
  - первым обрабатывается блок $\boldsymbol{B_0}$.
  - во время обработки $\boldsymbol{B_0}$ будет вызван $\boldsymbol{Rename(B_1)}$,
    - во время обработки $\boldsymbol{B_1}$ будут вызваны $\boldsymbol{Rename(B_2)}$, $\boldsymbol{Rename(B_7)}$ и $\boldsymbol{Rename(B_3)}$,
      - во время обработки $\boldsymbol{B_3}$ будет вызван $\boldsymbol{Rename(B_4)}$, $\boldsymbol{Rename(B_6)}$, $\boldsymbol{Rename(B_5)}$

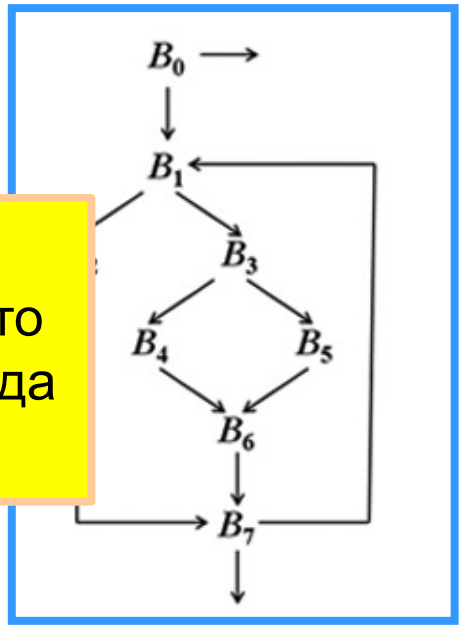
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

◊ Корнем обрабатываемой части дерева доминаторов является блок B_0. Поэтому «***Основной алгоритм***», обнулив счетчики и опустошив стеки для переменных из множества $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, сделает вызов $\boldsymbol{Rename(B_0)}$.

Вход в B_0	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	0
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	

B_0: `i ← 1;`



Счетчики для переменных a, b, c, d в этом примере сразу имеют значение 1, а не 0, так как считается, что этим переменным были присвоены значения до входа в блок B_0

◊ Увеличение счетчика для i на 1

- ◈ Заполнение параметров φ-функций в $\boldsymbol{B_1}$
- ◈ Вызов $\boldsymbol{Rename(B_1)}$

B_0: `i₀ ← 1;`

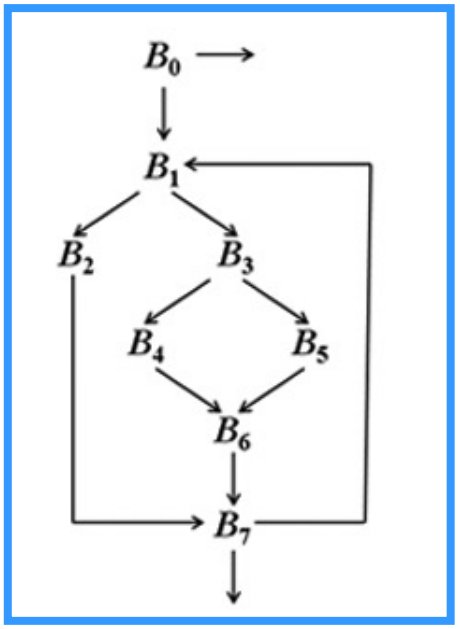
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

◊ Корнем обрабатываемой части дерева доминаторов является блок B_0. Поэтому «***Основной алгоритм***», обнулив счетчики и опустошив стеки для переменных из множества $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, сделает вызов $\boldsymbol{Rename(B_0)}$.

Вход в B_0	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	0
Стеки (↓)	$\mathtt{a}_0$	$\mathtt{b}_0$	$\mathtt{c}_0$	$\mathtt{d}_0$	

B_0: `i ← 1;`



◊ $\boldsymbol{Rename(B_0)}$:

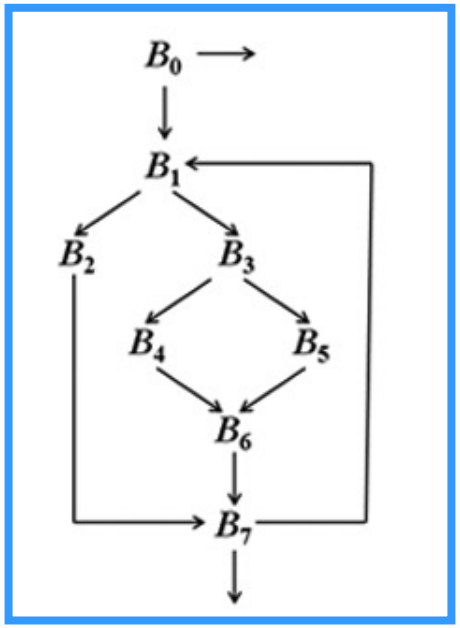
- Вызов $NewName$ **(i)** → возвращает имя $\mathtt{i}_0$
  - Замена `i ← 1;` на $\mathtt{i}_0$ `← 1;`
  - Занесение $\mathtt{i}_0$ в стек для i
  - Увеличение счетчика для i на 1
- Заполнение параметров φ-функций в $\boldsymbol{B_1}$
- Вызов $\boldsymbol{Rename(B_1)}$

B_0: $\mathtt{i}_0$ `← 1;`

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow$	1	B_5	$c \leftarrow$	
B_1	$a \leftarrow \varphi($	a_0 , a)	B_7	$a \leftarrow \varphi($	a , a)
	$b \leftarrow \varphi($	b_0 , b)		$b \leftarrow \varphi($	b , b)
	$c \leftarrow \varphi($	c_0 , c)		$c \leftarrow \varphi($	c , c)
	$d \leftarrow \varphi($	d_0 , d)		$d \leftarrow \varphi($	d , d)
	$i \leftarrow \varphi($	i_0 , i)		$y \leftarrow$	$+, a, b$
	$a \leftarrow$			$z \leftarrow$	$+, c, d$
	$b \leftarrow$			$i \leftarrow$	$+, i, 1$
B_2	$b \leftarrow$		B_3	$a \leftarrow$	
	$c \leftarrow$			$d \leftarrow$	
	$d \leftarrow$				
B_4	$d \leftarrow$		B_6	$c \leftarrow \varphi($	c , c)
				$d \leftarrow \varphi($	d , d)
				$b \leftarrow$	



a	b	c	d	i
1	1	1	1	1
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0

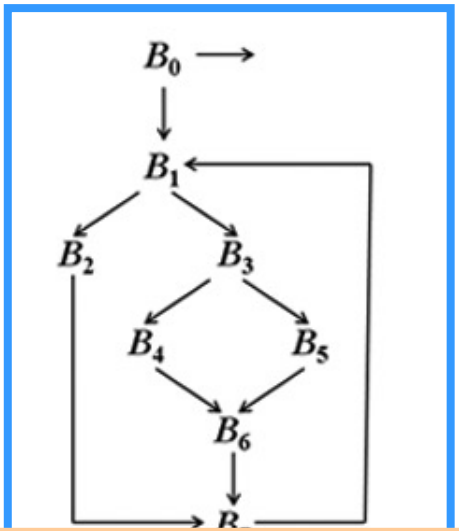
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

◊ Корнем обрабатываемой части дерева доминаторов является блок B_0. Поэтому «***Основной алгоритм***», обнулив счетчики и опустошив стеки для переменных из множества $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, сделает вызов $\boldsymbol{Rename(B_0)}$.

Вход в B_0	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	0
Стеки (↓)	$\mathtt{a}_0$	$\mathtt{b}_0$	$\mathtt{c}_0$	$\mathtt{d}_0$	

B_0: `i ← 1;`



◊ $\boldsymbol{Rename(B_0)}$:

- Вызов $NewName$ **(i)** → возвращает имя $\mathtt{i}_0$
  - Замена `i ← 1;` на $\mathtt{i}_0$ `← 1;`
  - Занесение $\mathtt{i}_0$ в стек для i
  - Увеличение счетчика для i на 1
- Заполнение параметров φ-функций в $\boldsymbol{B_1}$
- Вызов $\boldsymbol{Rename(B_1)}$

$B_1 = Succ(B_0)$ по ГПУ

B_0: $\mathtt{i}_0$ `← 1;`

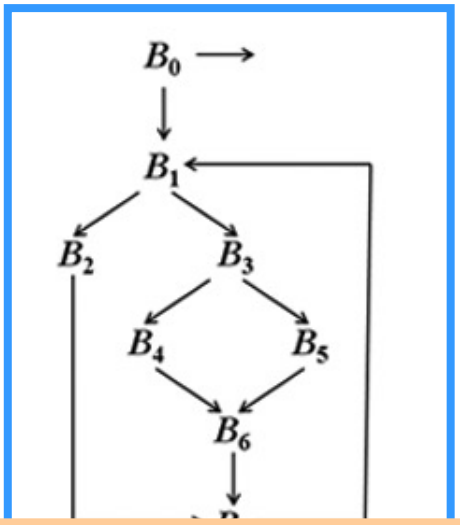
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

◊ Корнем обрабатываемой части дерева доминаторов является блок B_0. Поэтому «***Основной алгоритм***», обнулив счетчики и опустошив стеки для переменных из множества $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, сделает вызов ***Rename*(B_0)**.

Вход в B_0	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	0
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	

B_0: `i ← 1;`



◊ ***Rename*(B_0)**:

- Вызов *NewName* **(i)** → возвращает имя i_0
  - Замена `i ← 1;` на i_0 `← 1;`
  - Занесение i_0 в стек для i
  - Увеличение счетчика для i на 1
- Заполнение параметров φ-функций в B_1
- Вызов ***Rename*(B_1)**

$B_1 = Succ(B_0)$ по ГПУ

$B_1 = Succ(B_0)$ по дереву доминаторов

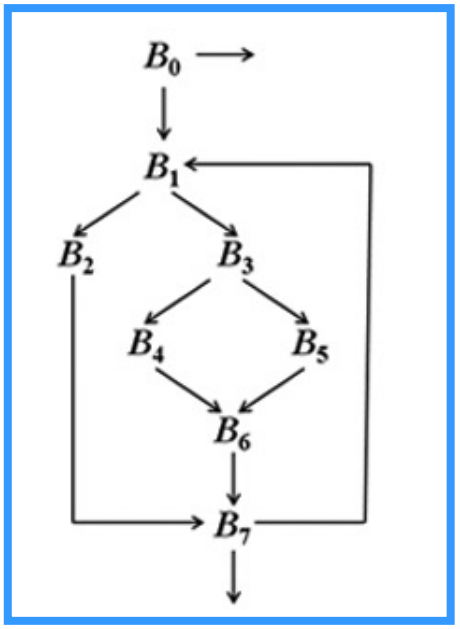
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

◊ Корнем обрабатываемой части дерева доминаторов является блок B_0. Поэтому «***Основной алгоритм***», обнулив счетчики и опустошив стеки для переменных из множества $Globals = \{a, b, c, d, i\}$, сделает вызов $\boldsymbol{Rename(B_0)}$.

Вход в B_0	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	0
Стеки (↓)	$\mathtt{a}_0$	$\mathtt{b}_0$	$\mathtt{c}_0$	$\mathtt{d}_0$	

B_0: `i ← 1;`



◊ $\boldsymbol{Rename(B_0)}$:

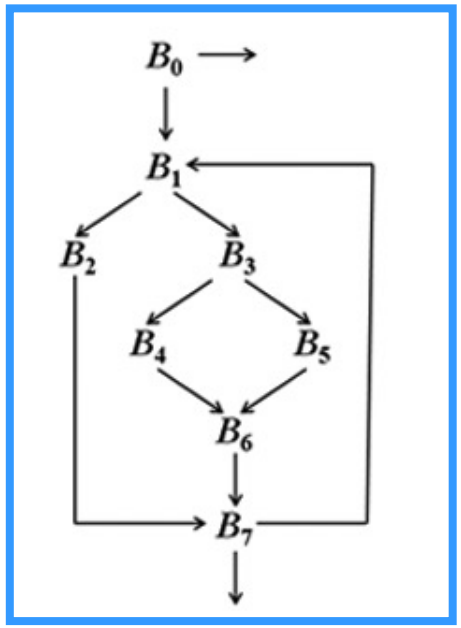
- Вызов *NewName* **(i)** → возвращает имя $\mathtt{i}_0$
  - Замена `i ← 1;` на $\mathtt{i}_0$ `← 1;`
  - Занесение $\mathtt{i}_0$ в стек для i
  - Увеличение счетчика для i на 1
- Заполнение параметров φ-функций в $\boldsymbol{B_1}$
- Вызов $\boldsymbol{Rename(B_1)}$

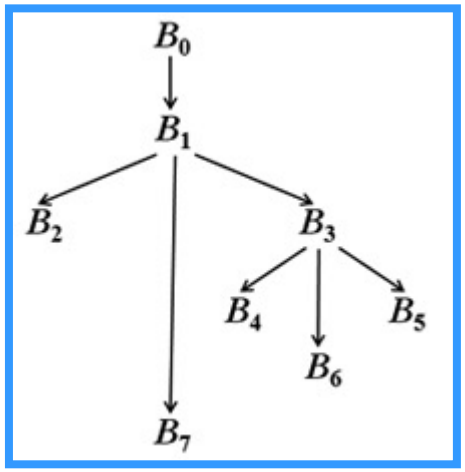
B_0: $\mathtt{i}_0$ `← 1;`

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	1
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0





Rename(B_1):

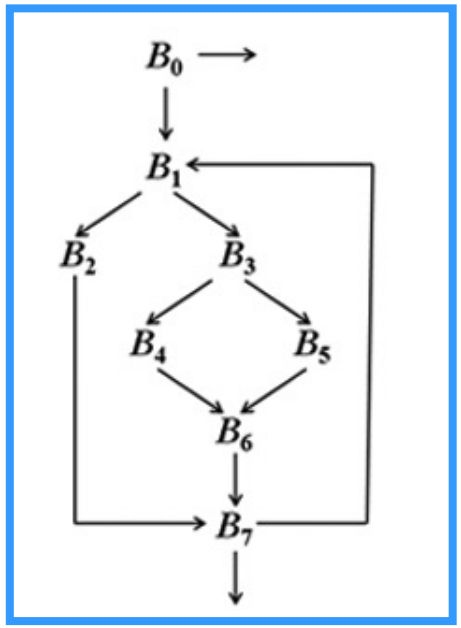
1. Переименование φ-функций

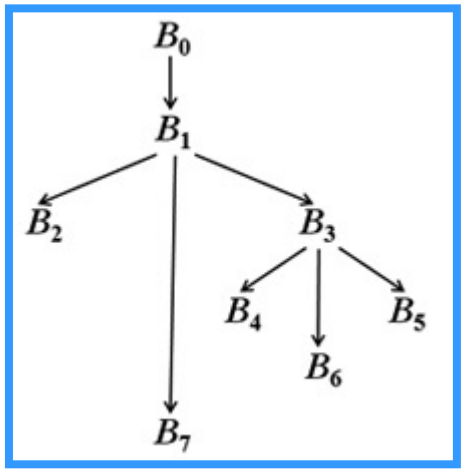
```
B1  a ← φ( a0 , a )
    b ← φ( b0 , b )
    c ← φ( c0 , c )
    d ← φ( d0 , d )
    i ← φ( i0 , i )
    a ←
    b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	1	1	1	1	1
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0





Rename(B_1):

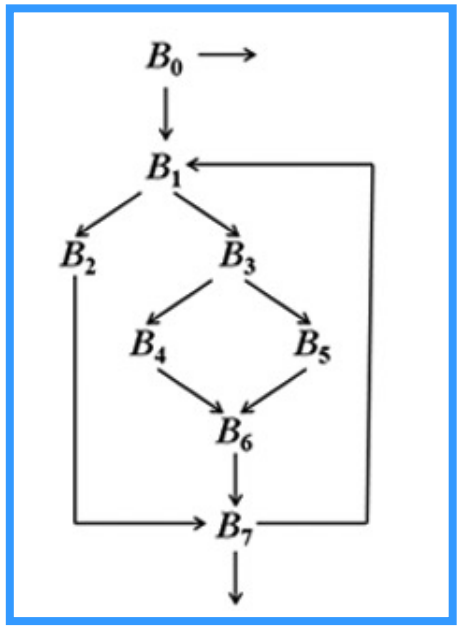
1. Переименование φ-функций

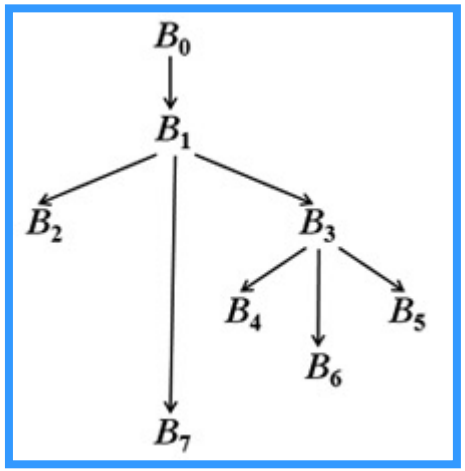
B_1	$a \leftarrow \varphi(a_0, a)$
	$b \leftarrow \varphi(b_0, b)$
	$c \leftarrow \varphi(c_0, c)$
	$d \leftarrow \varphi(d_0, d)$
	$i \leftarrow \varphi(i_0, i)$
	$a \leftarrow$
	$b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	2	1	1	1	1
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1				





Rename(B_1):

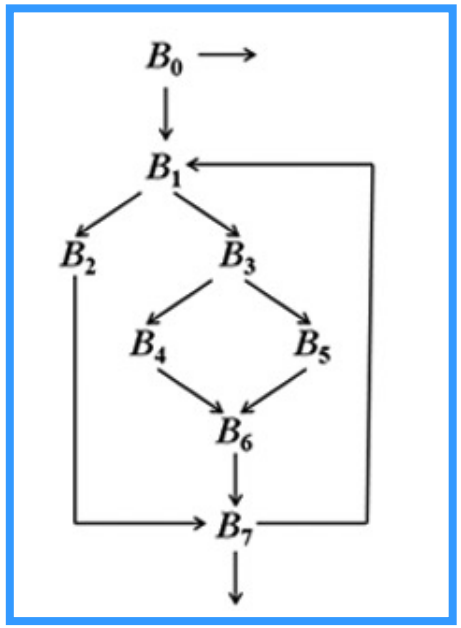
1. Переименование φ-функций

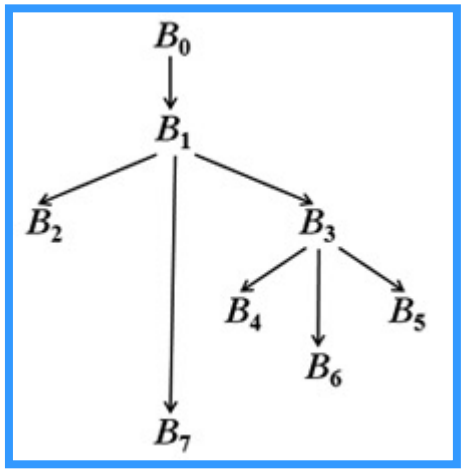
```
B1  a1 ← φ( a0 , a )
    b ← φ( b0 , b )
    c ← φ( c0 , c )
    d ← φ( d0 , d )
    i ← φ( i0 , i )
    a ←
    b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	2	2	1	1	1
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1			





Rename(B_1):

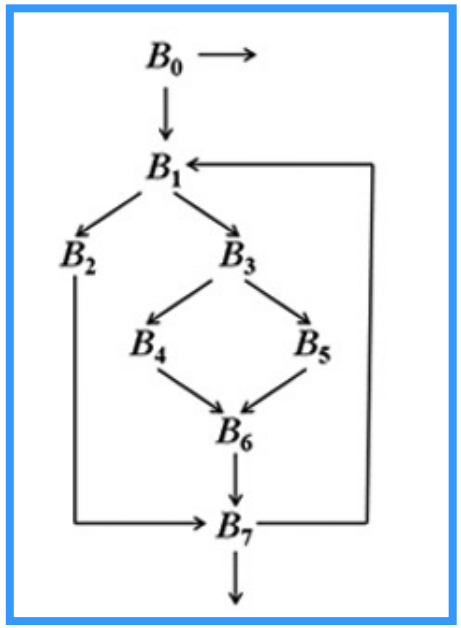
1. Переименование φ-функций

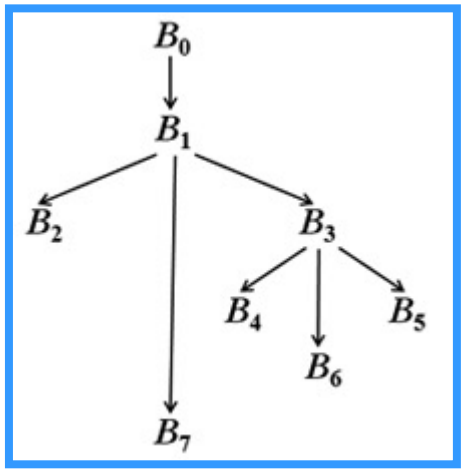
```
B1   a1 ← φ( a0 , a )
     b1 ← φ( b0 , b )
     c ← φ( c0 , c )
     d ← φ( d0 , d )
     i ← φ( i0 , i )
     a ←
     b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	2	2	2	1	1
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1		





Rename(B_1):

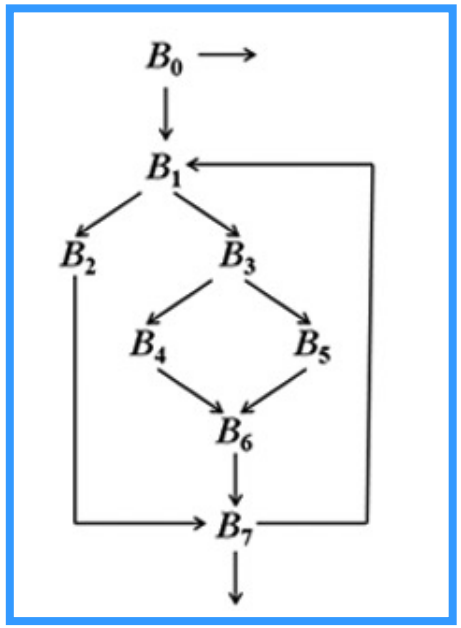
1. Переименование φ-функций

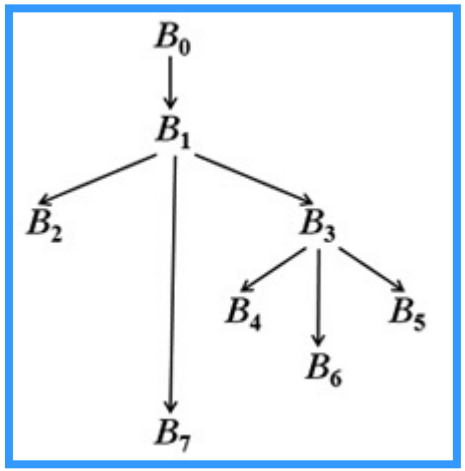
```
B1   a1 ← φ( a0 , a )
     b1 ← φ( b0 , b )
     c1 ← φ( c0 , c )
     d ← φ( d0 , d )
     i ← φ( i0 , i )
     a ←
     b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	2	2	2	2	1
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	





Rename(B_1):

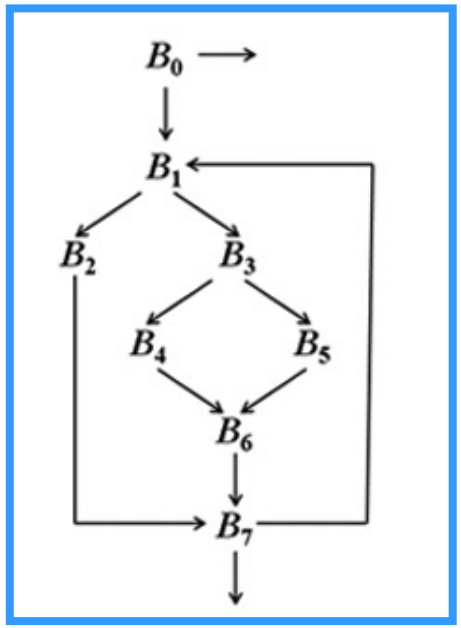
1. Переименование φ-функций

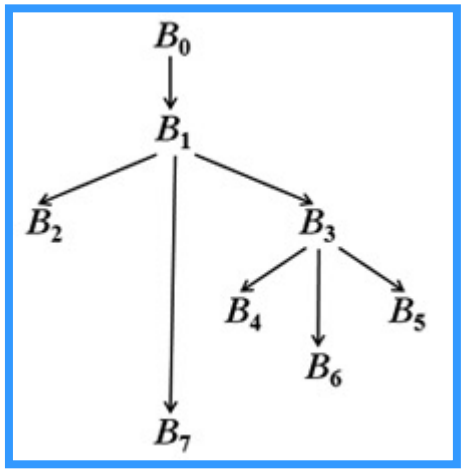
```
B1   a1 ← φ( a0 , a )
     b1 ← φ( b0 , b )
     c1 ← φ( c0 , c )
     d1 ← φ( d0 , d )
     i ← φ( i0 , i )
     a ←
     b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	2	2	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1





Rename(B_1):

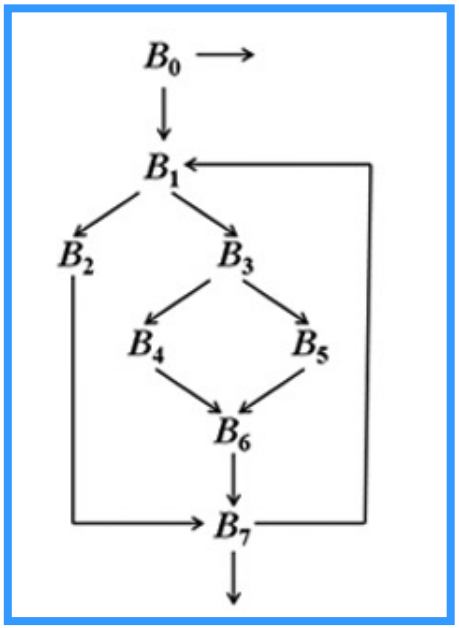
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций

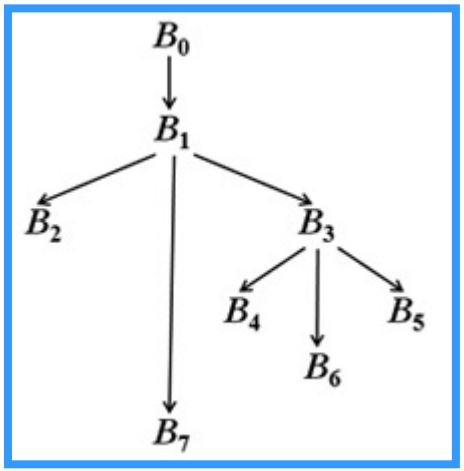
```
B1  a1 ← φ( a0 , a )
    b1 ← φ( b0 , b )
    c1 ← φ( c0 , c )
    d1 ← φ( d0 , d )
    i1 ← φ( i0 , i )
    a ←
    b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	2	2	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1





Rename(B_1):

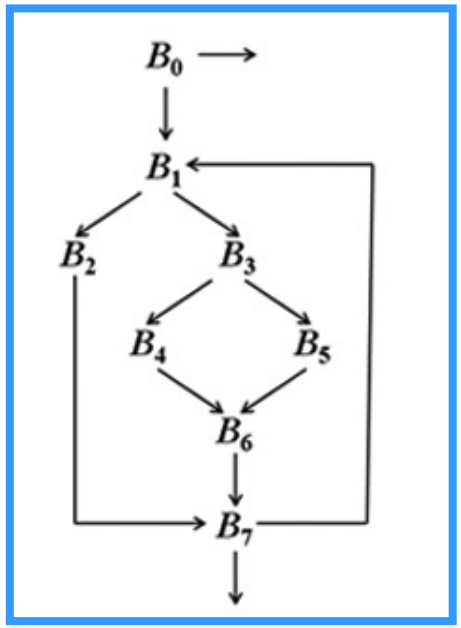
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

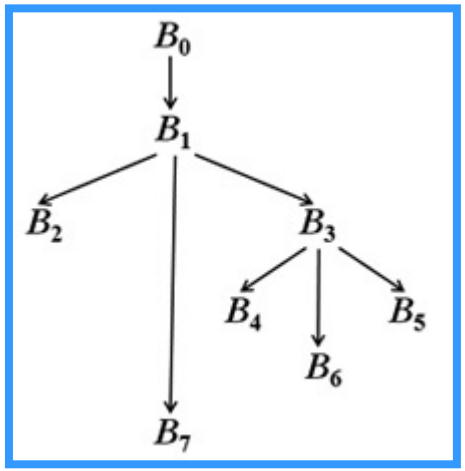
```
B1  a1 ← φ( a0 , a )
    b1 ← φ( b0 , b )
    c1 ← φ( c0 , c )
    d1 ← φ( d0 , d )
    i1 ← φ( i0 , i )
    a ←
    b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	3	2	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2				





Rename(B_1):

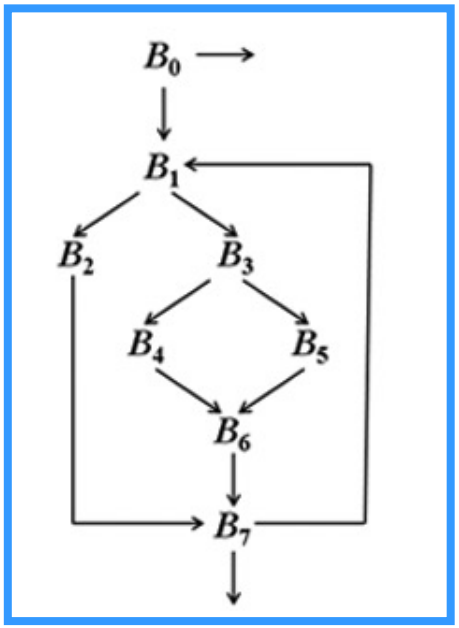
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

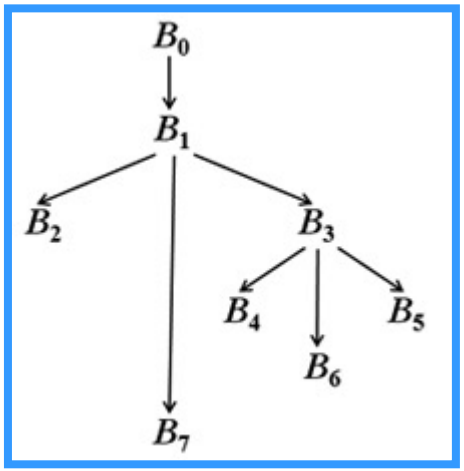
```
B1  a1 ← φ( a0 , a )
    b1 ← φ( b0 , b )
    c1 ← φ( c0 , c )
    d1 ← φ( d0 , d )
    i1 ← φ( i0 , i )
    a2 ←
    b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_1):

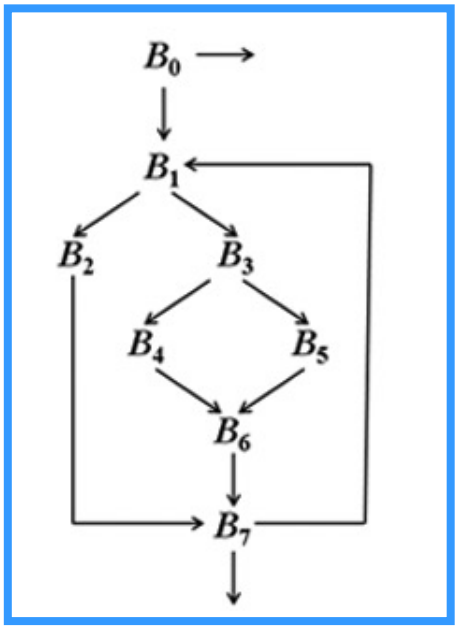
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG (в потомках B_1 нет φ-функций)

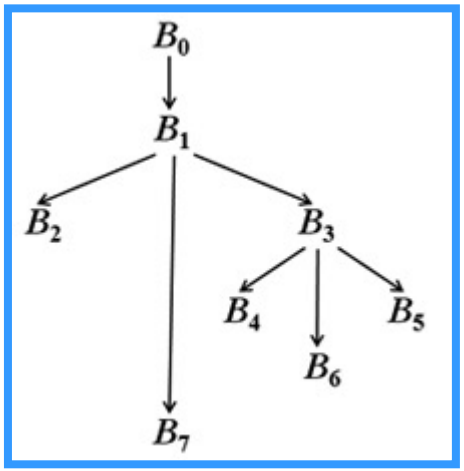
```
B1  a1 ← φ( a0 , a )
    b1 ← φ( b0 , b )
    c1 ← φ( c0 , c )
    d1 ← φ( d0 , d )
    i1 ← φ( i0 , i )
    a2 ←
    b2 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_1):

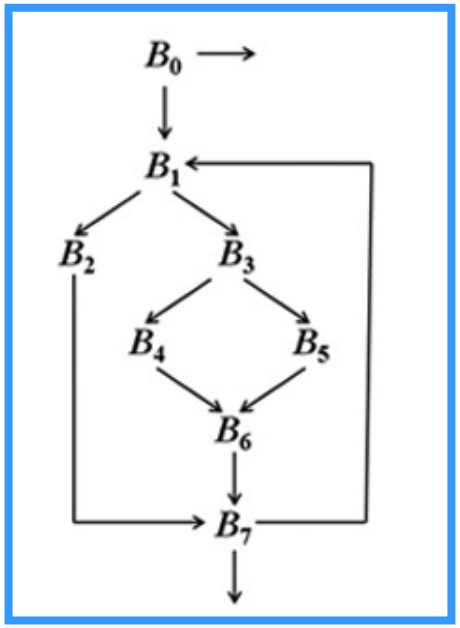
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG (в потомках B_1 нет φ-функций)
4. ***Rename***(B_2)

```
B1   a1 ← φ( a0 , a )
     b1 ← φ( b0 , b )
     c1 ← φ( c0 , c )
     d1 ← φ( d0 , d )
     i1 ← φ( i0 , i )
     a2 ←
     b2 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow 1$	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a)$	B_7	$a \leftarrow \varphi(a, a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b)$		$b \leftarrow \varphi(b, b)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c)$		$c \leftarrow \varphi(c, c)$
	$d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d)$		$d \leftarrow \varphi(d, d)$
	$i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i)$		$y \leftarrow +, a, b$
	$a_2 \leftarrow$		$z \leftarrow +, c, d$
	$b_2 \leftarrow$		$i \leftarrow +, i, 1$
B_2	$b \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$
	$c \leftarrow$		$d \leftarrow$
	$d \leftarrow$		
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c, c)$
			$d \leftarrow \varphi(d, d)$
			$b \leftarrow$

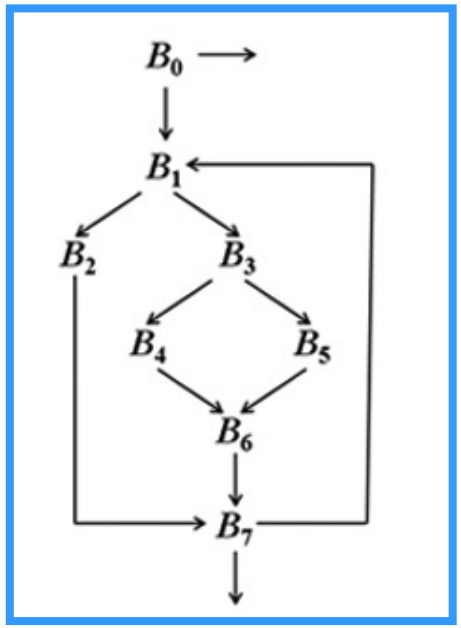


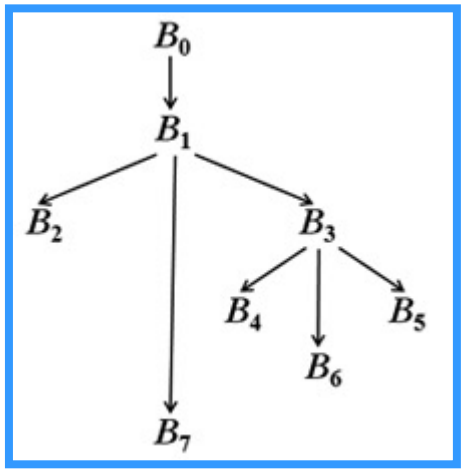
a	b	c	d	i
3	3	2	2	2
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2			

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_2):

1. Переименование φ-функций

B_2 **b** ←

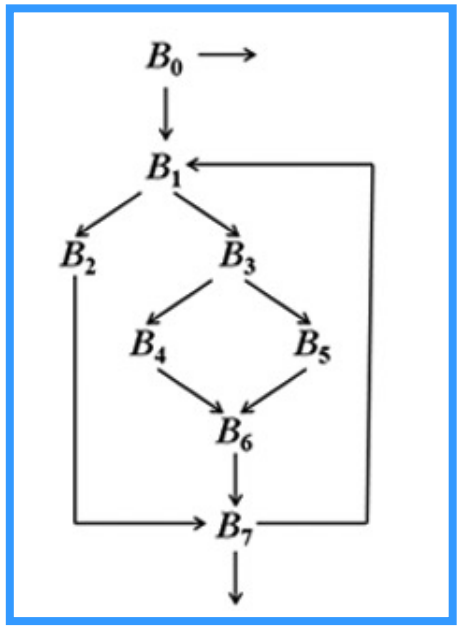
c ←

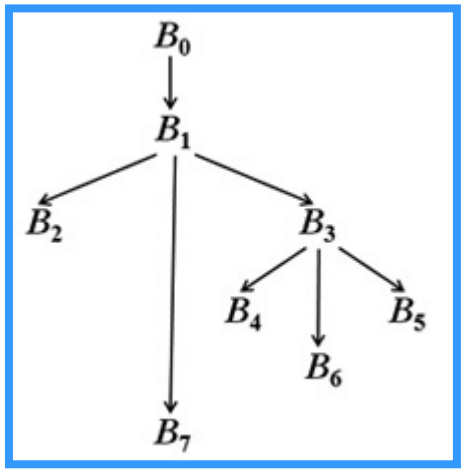
d ←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_2):

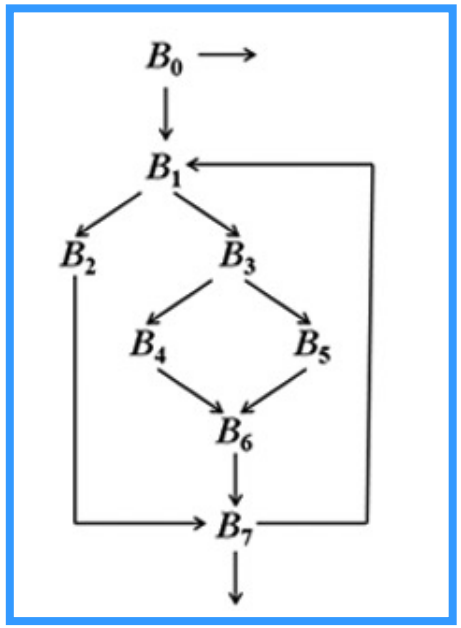
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

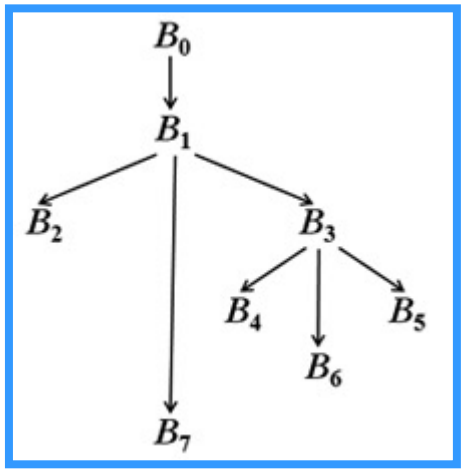
B_2	
	b ←
	c ←
	d ←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

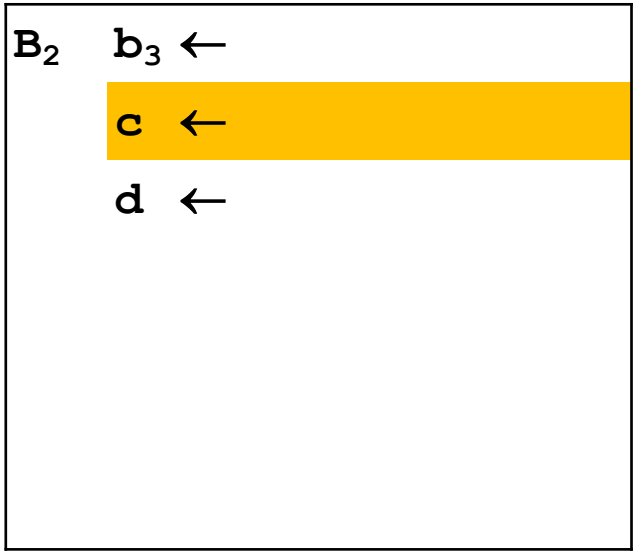
B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	2	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			
		b_3			





Rename(B_2):

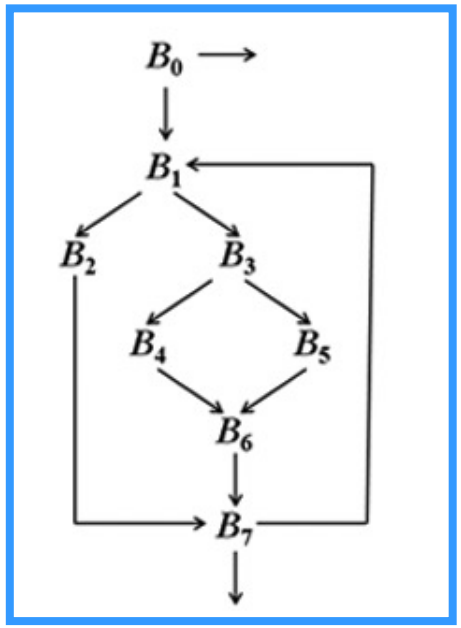
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

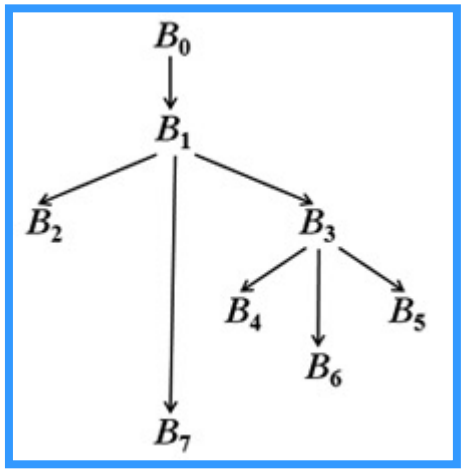


6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

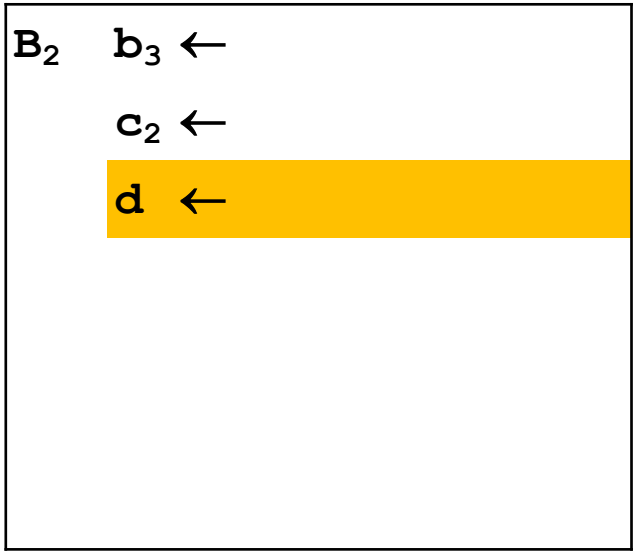
B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	2	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_2		
		b_3			





Rename(B_2):

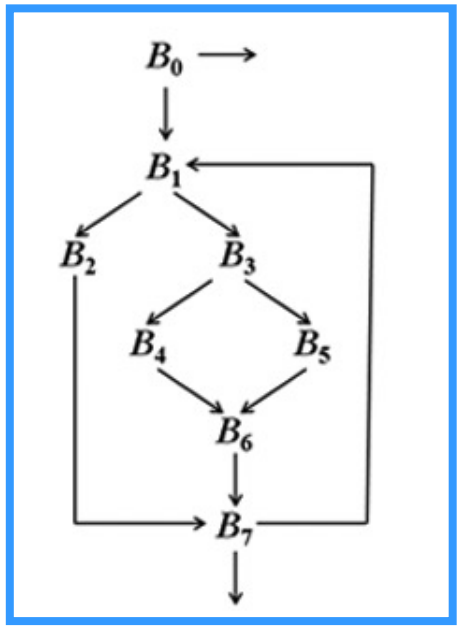
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

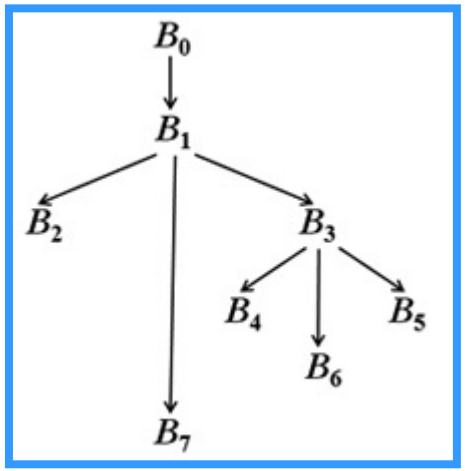


6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_2	d_2	
		b_3			





Rename(B_2):

1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

B_2 $b_3 \leftarrow$

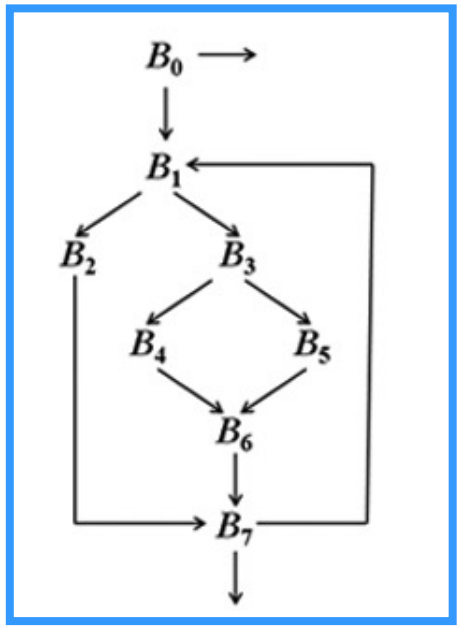
$c_2 \leftarrow$

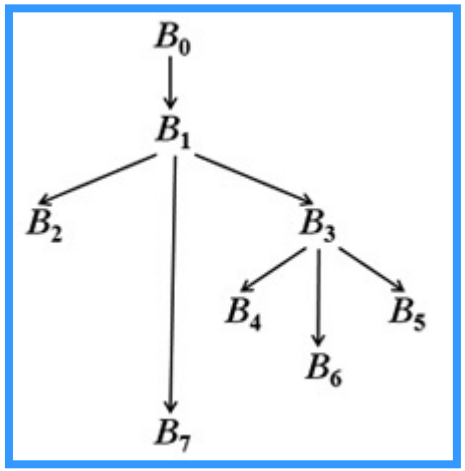
$d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_2	d_2	
		b_3			





Rename(B_2):

1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG

B_2 $b_3 \leftarrow$

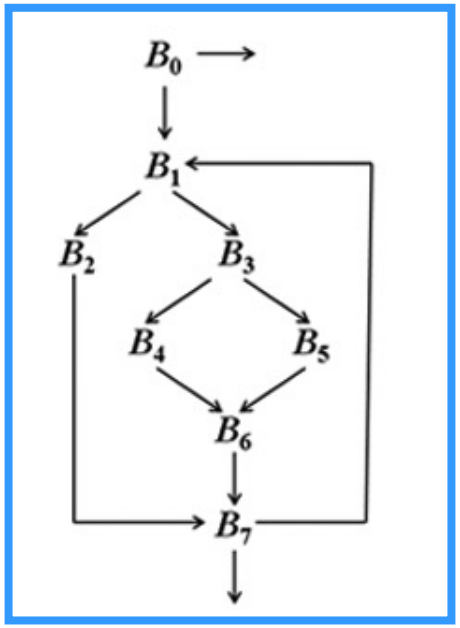
$c_2 \leftarrow$

$d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow 1$	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7	$a \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

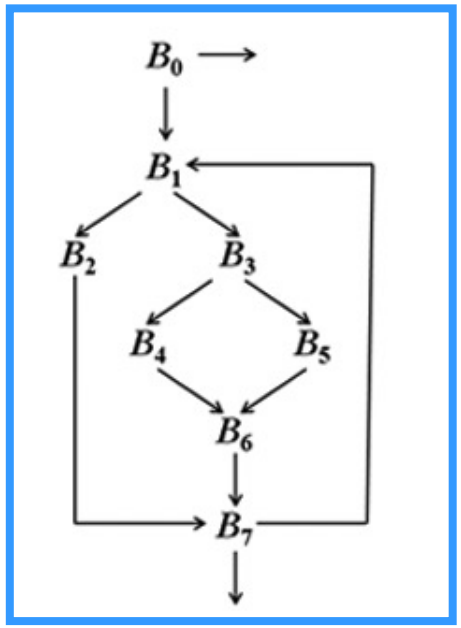


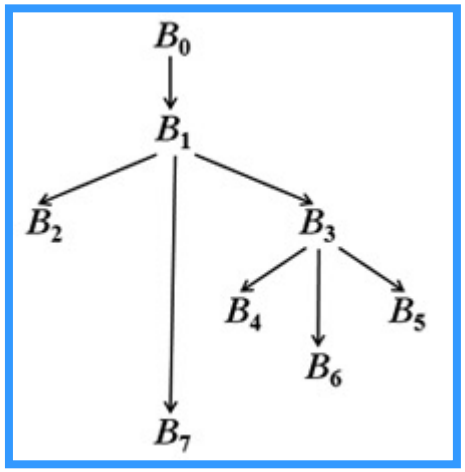
a	*b*	*c*	*d*	*i*
3	4	3	3	2
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2	c_2	d_2	
	b_3			

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_2	d_2	
		b_3			





Rename(B_2):

1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов

B_2 $b_3 \leftarrow$

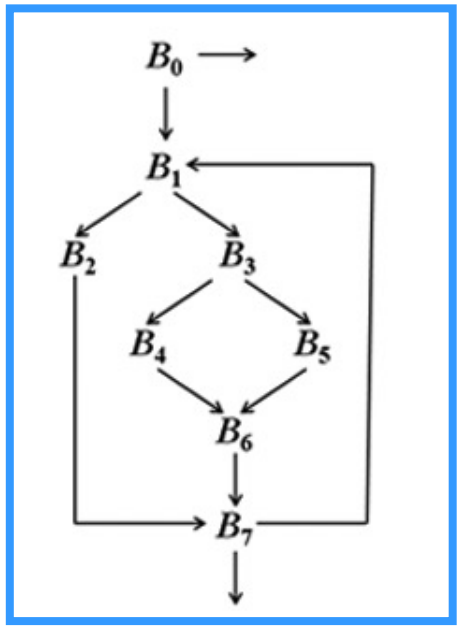
$c_2 \leftarrow$

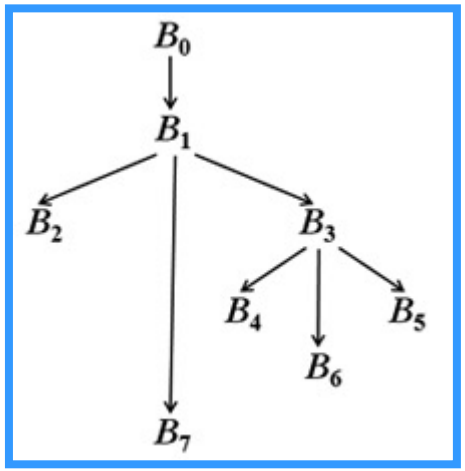
$d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_2	d_2	
		b_3			





Rename(B_2):

1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека

B_2 $b_3 \leftarrow$

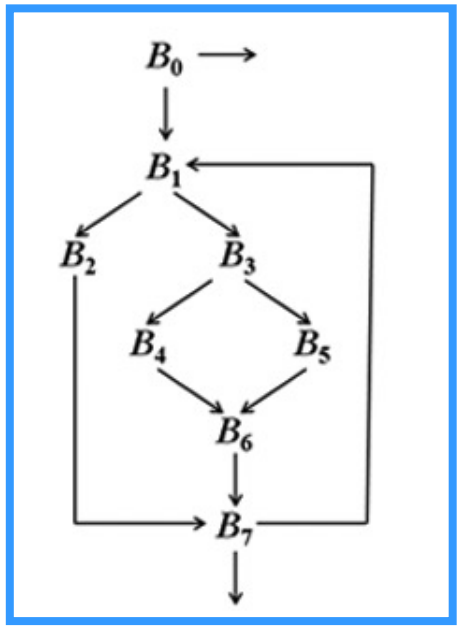
$c_2 \leftarrow$

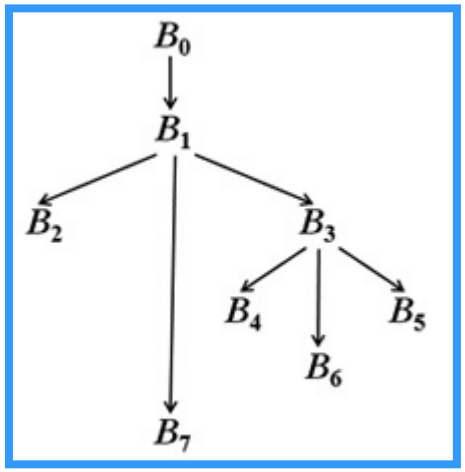
$d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

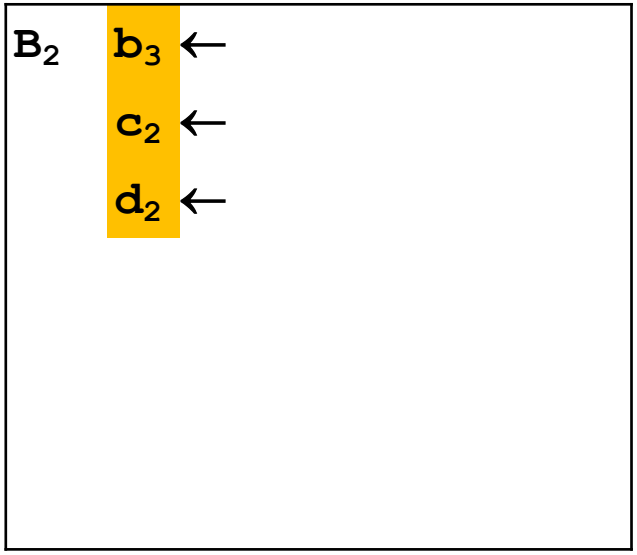
B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_2	d_2	
		b_3			





Rename(B_2):

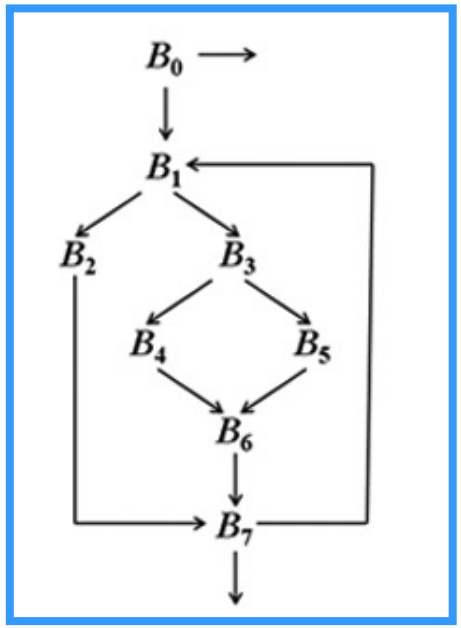
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека

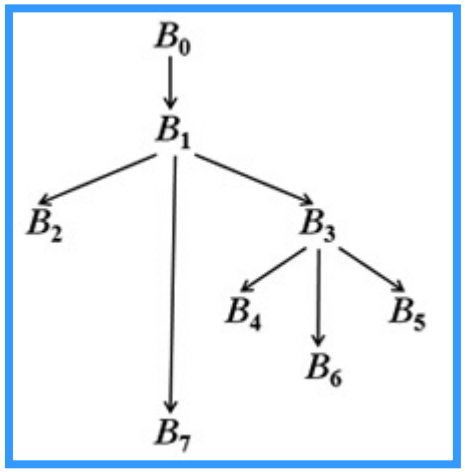


6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_2):

1. Переименование φ−функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_1

B_2 $b_3 \leftarrow$

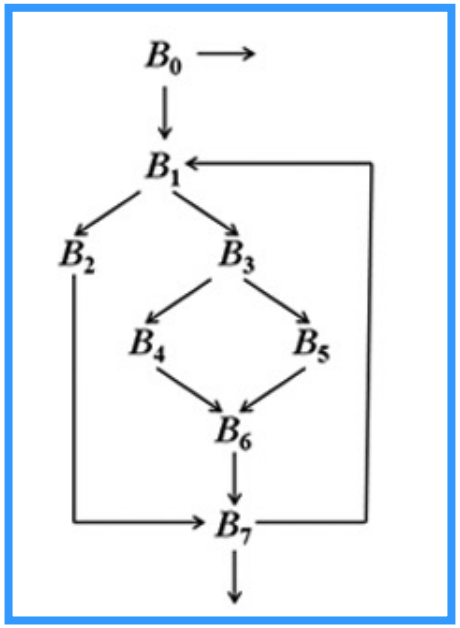
$c_2 \leftarrow$

$d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow$ 1	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7	$a \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

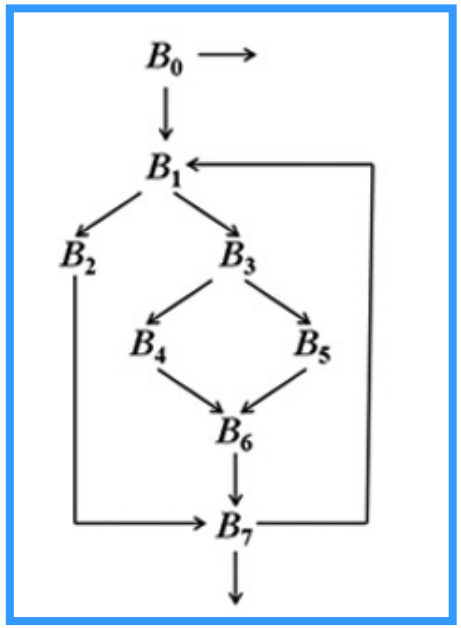


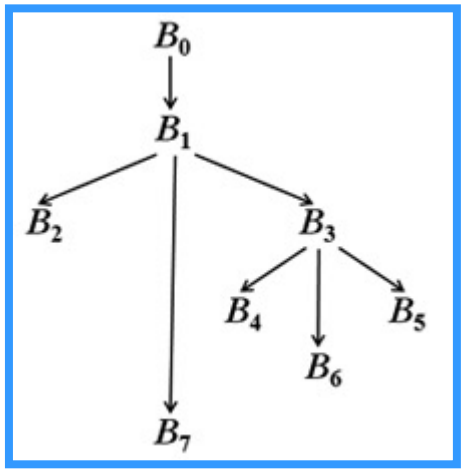
a	*b*	*c*	*d*	*i*
3	4	3	3	2
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2			

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			



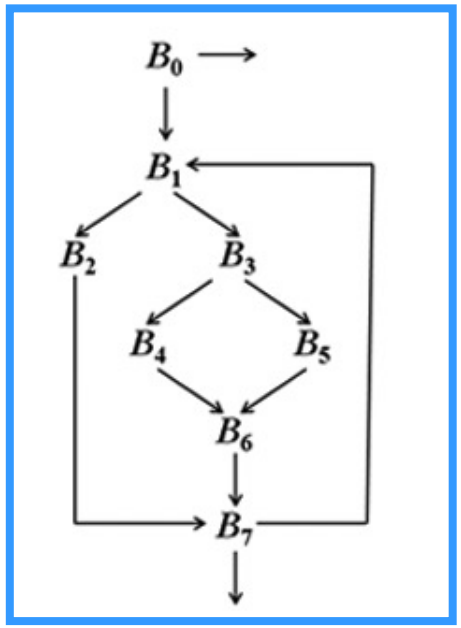


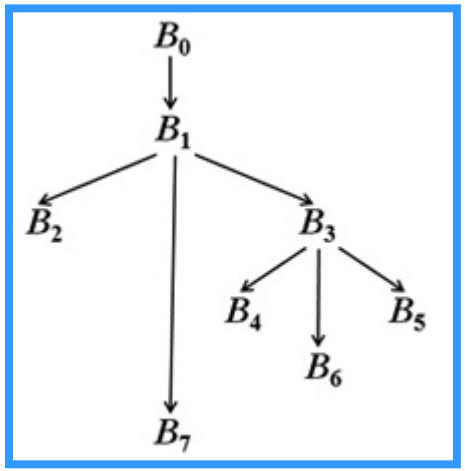
Rename(B_1):
Вызов ***Rename***(B_7) так как B_7 следующий потомок в дереве доминаторов

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_7):

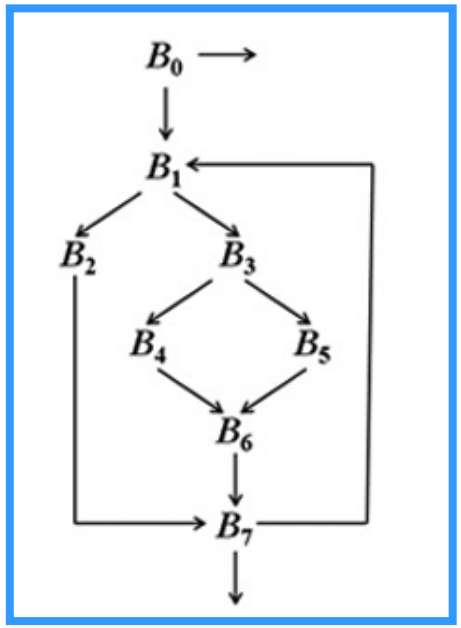
1. Переименование φ-функций

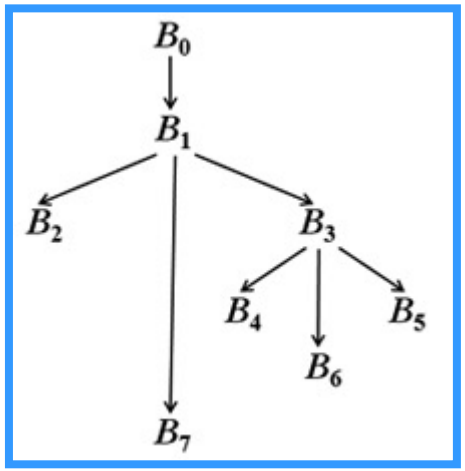
B_7	$a \leftarrow \varphi(a_2, a)$
	$b \leftarrow \varphi(b_3, b)$
	$c \leftarrow \varphi(c_2, c)$
	$d \leftarrow \varphi(d_2, d)$
	$y \leftarrow +, a, b$
	$z \leftarrow +, c, d$
	$i \leftarrow +, i, 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	4	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			
	a_3				





Rename(B_7):

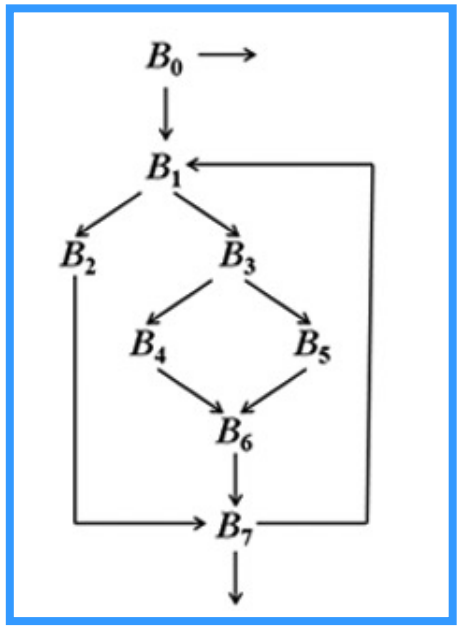
1. Переименование φ-функций

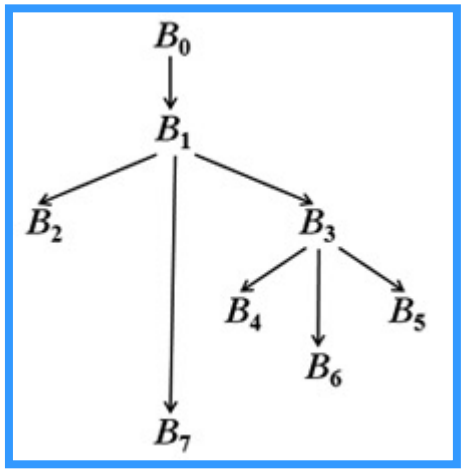
```
B7   a3 ← φ( a2 , a )
     b ← φ( b3 , b )
     c ← φ( c2 , c )
     d ← φ( d2 , d )
     y ←    +, a , b
     z ←    +, c , d
     i ←    +, i , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	3	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

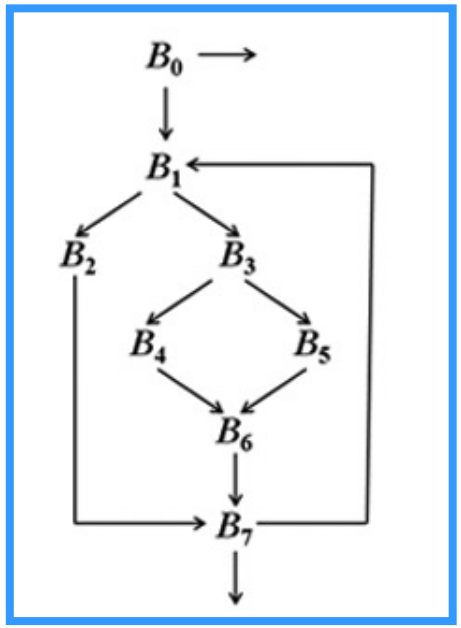
1. Переименование φ-функций

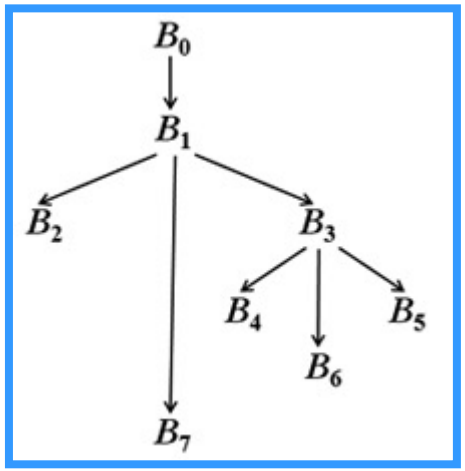
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c  ← φ( c2 , c )
    d  ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a , b
    z  ←    +, c , d
    i  ←    +, i , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	3	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3		
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

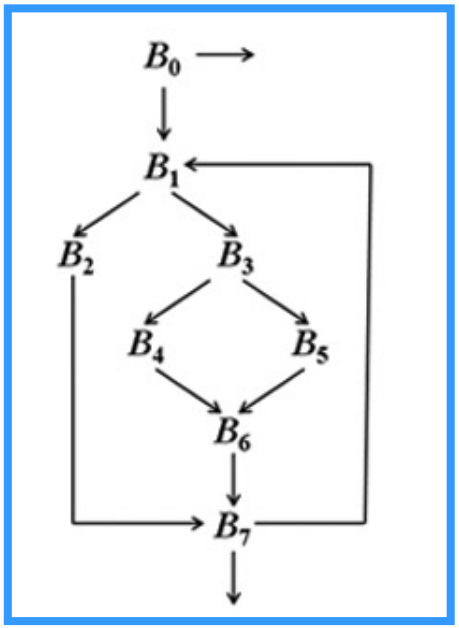
1. Переименование φ-функций

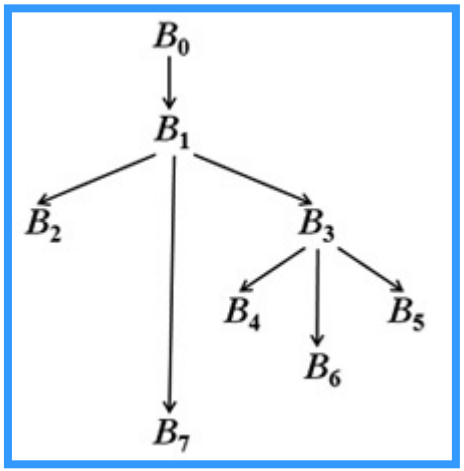
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d  ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a , b
    z  ←    +, c , d
    i  ←    +, i , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

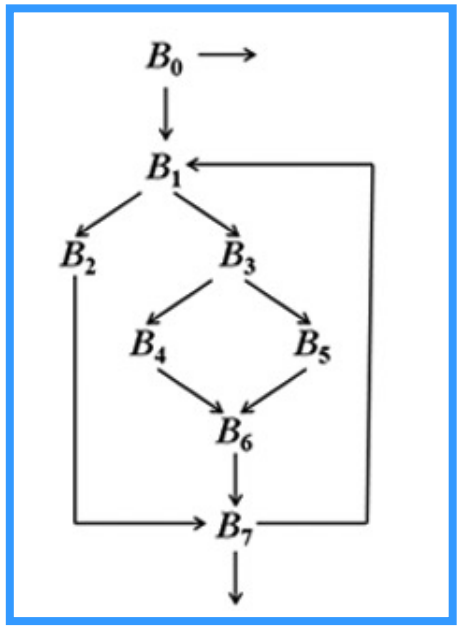
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

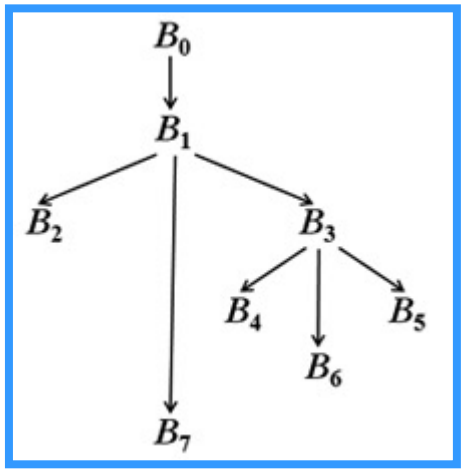
```
B7   a3 ← φ( a2 , a )
     b4 ← φ( b3 , b )
     c3 ← φ( c2 , c )
     d3 ← φ( d2 , d )
     y  ←    +, a , b
     z  ←    +, c , d
     i  ←    +, i , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

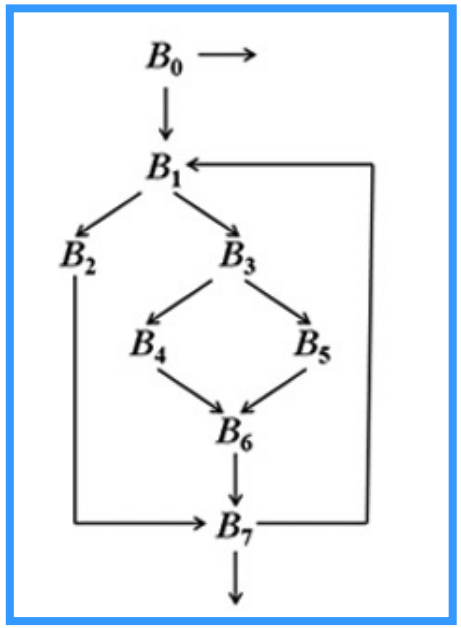
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

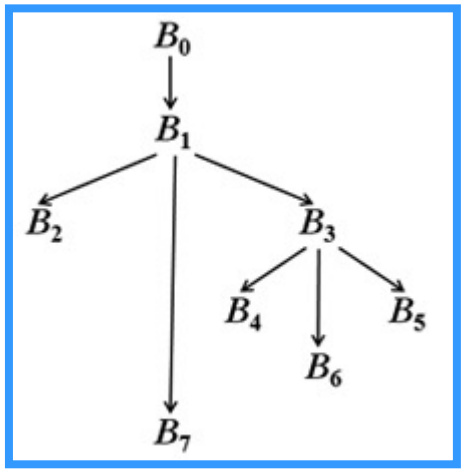
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d3 ← φ( d2 , d )
    y ←    +, a , b
    z ←    +, c , d
    i ←    +, i , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

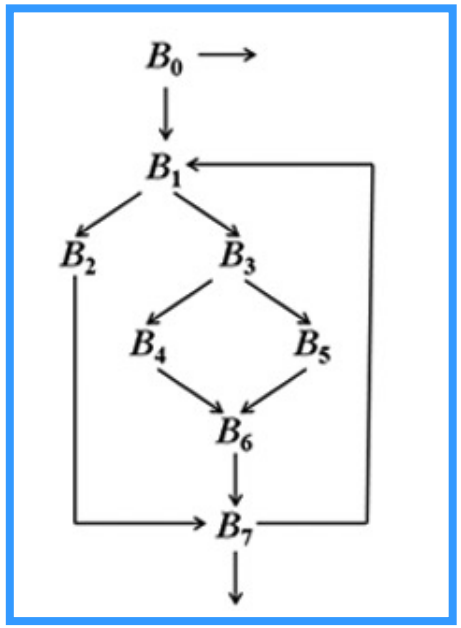
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

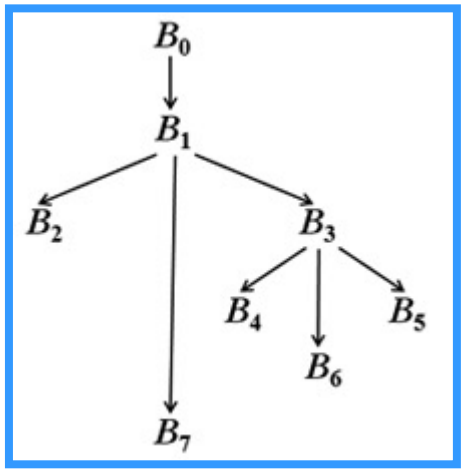
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d3 ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a3 , b4
    z  ←    +, c  , d
    i  ←    +, i  , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

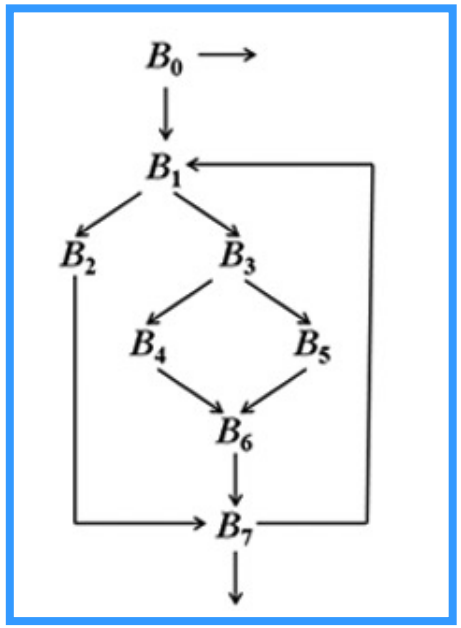
Переменная y не является глобальной

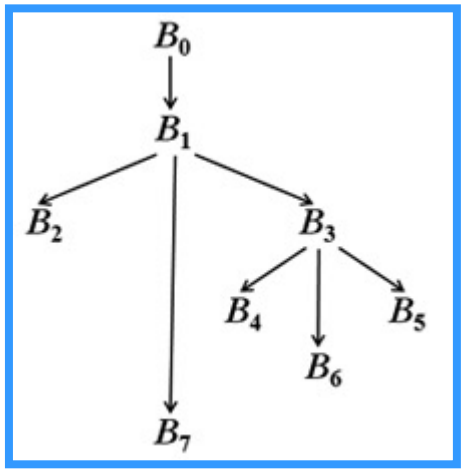
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d3 ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a3 , b4
    z  ←    +, c  , d
    i  ←    +, i  , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

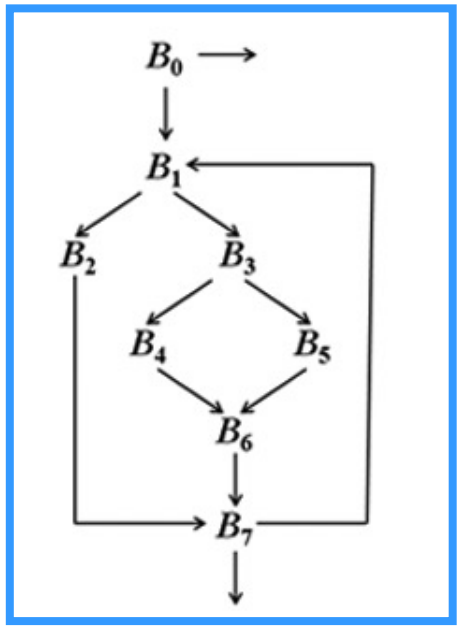
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

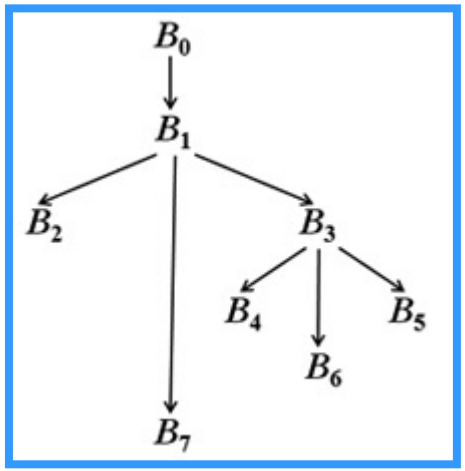
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d3 ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a3 , b4
    z  ←    +, c  , d
    i  ←    +, i  , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

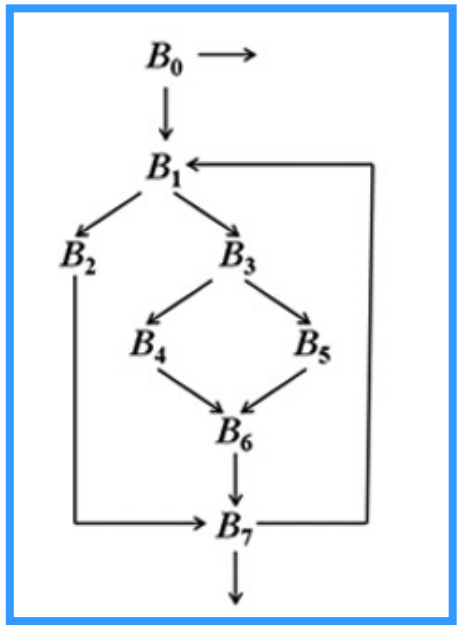
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

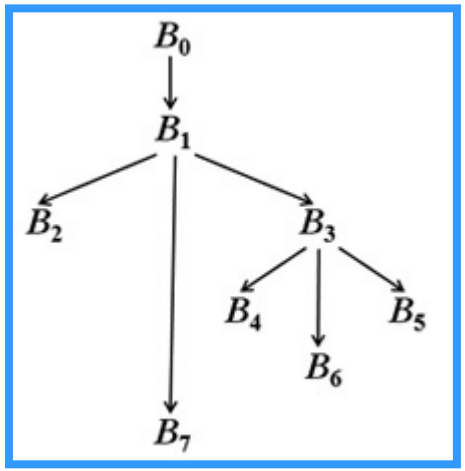
```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d3 ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a3 , b4
    z  ←    +, c3 , d3
    i  ←    +, i  , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	i_2
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

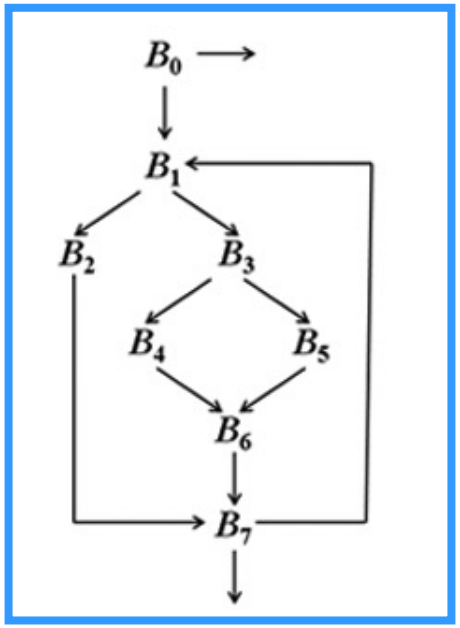
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG

```
B7  a3 ← φ( a2 , a )
    b4 ← φ( b3 , b )
    c3 ← φ( c2 , c )
    d3 ← φ( d2 , d )
    y  ←    +, a3 , b4
    z  ←    +, c3 , d3
    i2 ←    +, i1 , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow 1$	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

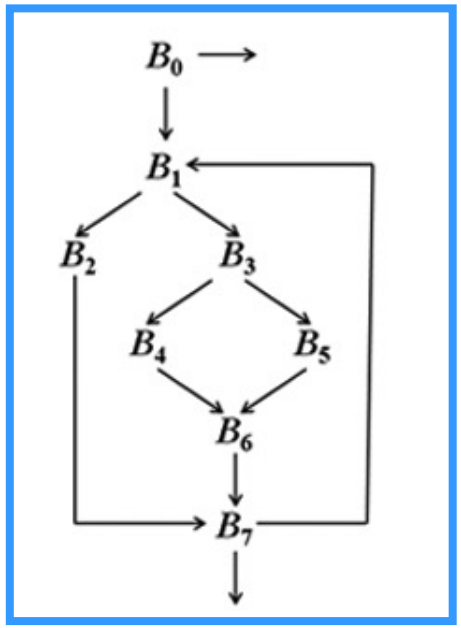


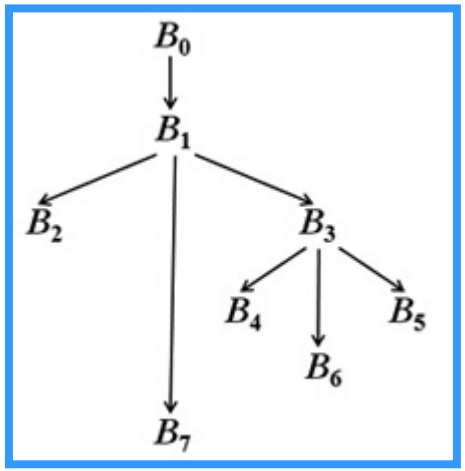
a	*b*	*c*	*d*	*i*
4	5	4	4	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2	c_3	d_3	i_2
a_3	b_4			

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_3	d_3	i_2
	a_3	b_4			





Rename(B_7):

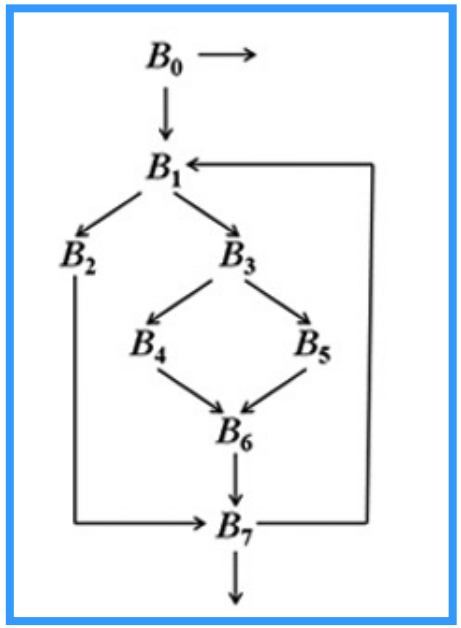
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_1

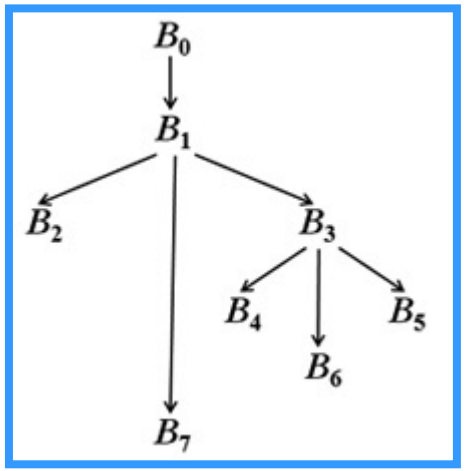
```
B7   a3 ← φ( a2 , a )
     b4 ← φ( b3 , b )
     c3 ← φ( c2 , c )
     d3 ← φ( d2 , d )
     y  ←    +, a3 , b4
     z  ←    +, c3 , d3
     i2 ←    +, i1 , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_7):

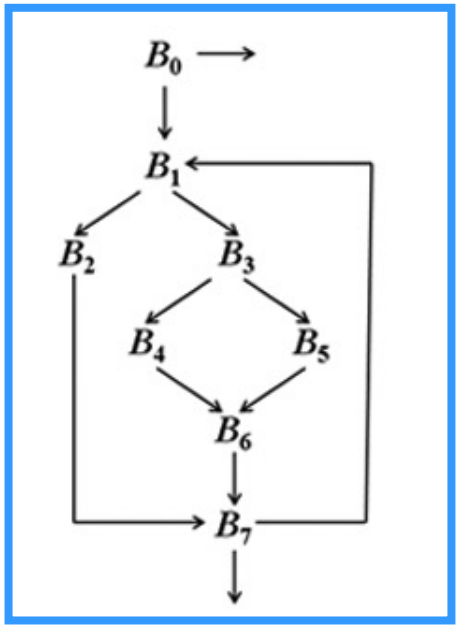
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_1

```
B7   a3 ← φ( a2 , a )
     b4 ← φ( b3 , b )
     c3 ← φ( c2 , c )
     d3 ← φ( d2 , d )
     y  ←    +, a3 , b4
     z  ←    +, c3 , d3
     i2 ←    +, i1 , 1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow 1$	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$	B_7	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$		$b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$		$c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$
	$d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$		$d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$
	$i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$		$y \leftarrow +, a_3, b_4$
	$a_2 \leftarrow$		$z \leftarrow +, c_3, d_3$
	$b_2 \leftarrow$		$i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$
	$c_2 \leftarrow$		$d \leftarrow$
	$d_2 \leftarrow$		
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c, c)$
			$d \leftarrow \varphi(d, d)$
			$b \leftarrow$

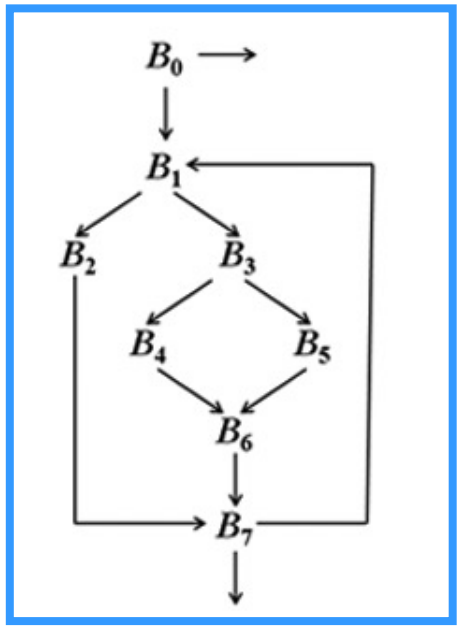


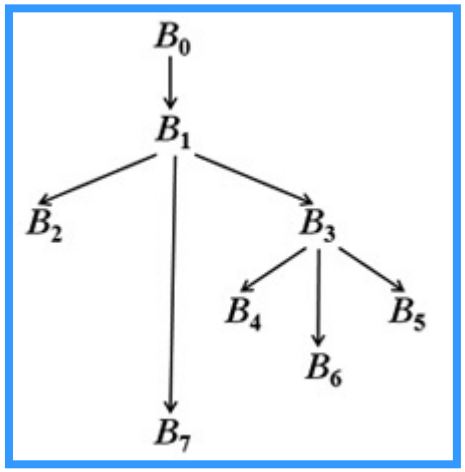
a	b	c	d	i
4	5	4	4	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2			

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





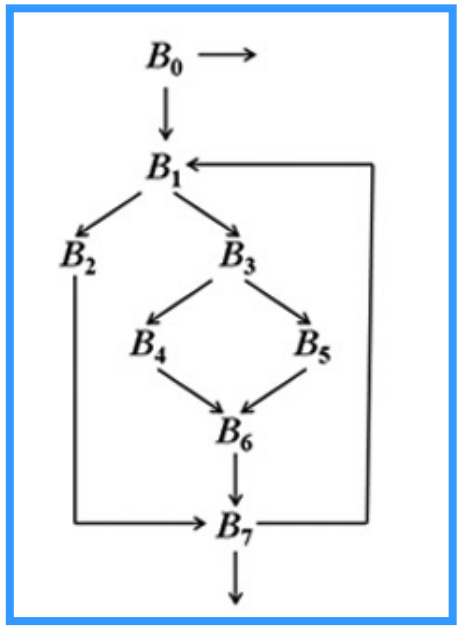
Rename(B_1):

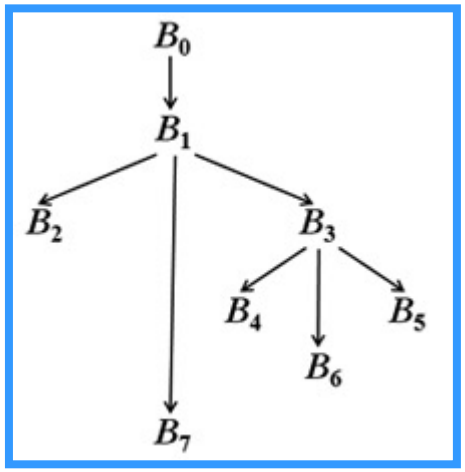
- ***Rename***(B_2) // Done
- ***Rename***(B_7) // Done
- ***Rename***(B_3)

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_3):

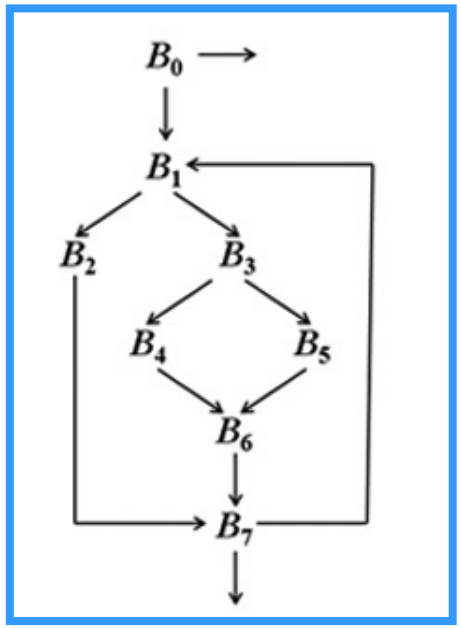
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

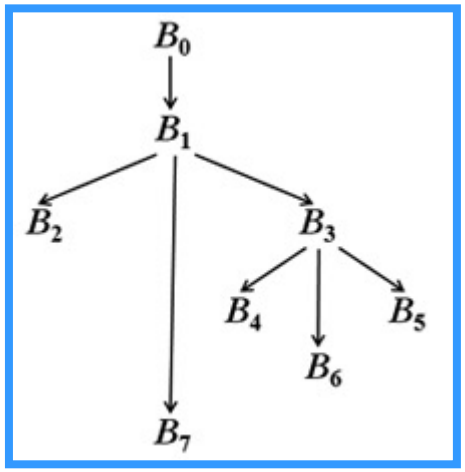
```
B3   a ←
     d ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_3):

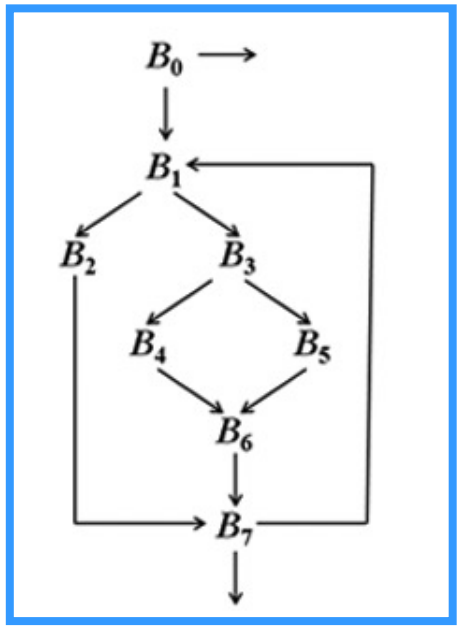
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

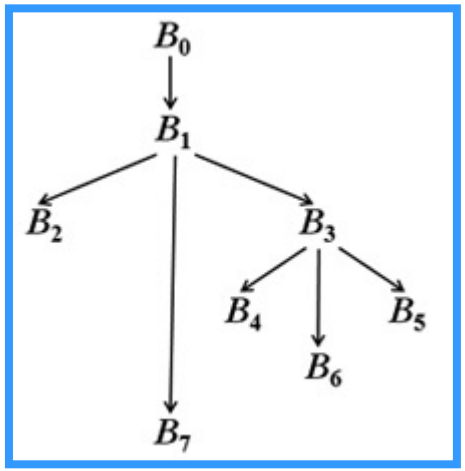
B_3	a ←
	d ←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	4	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			
	a_4				





Rename(B_3):

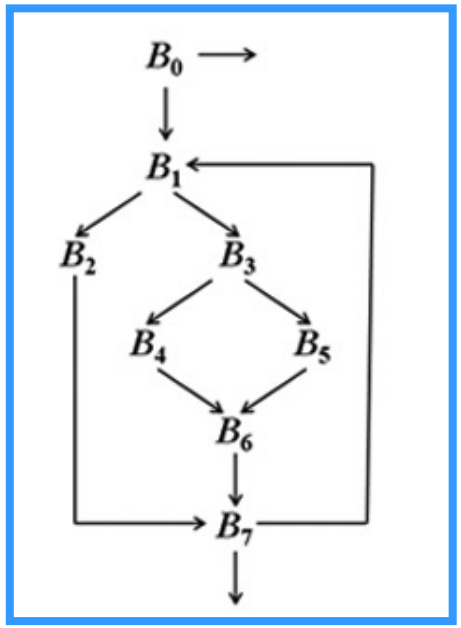
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

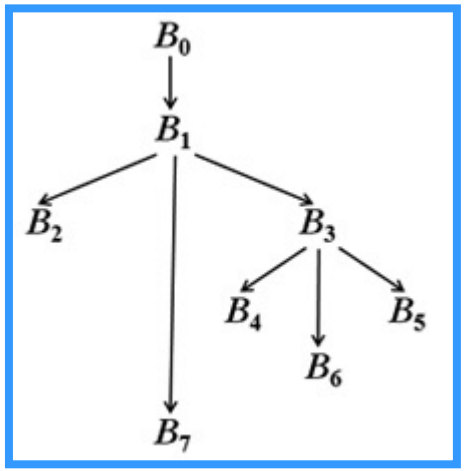
```
B3   a4 ←
     d  ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	4	5	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_3):

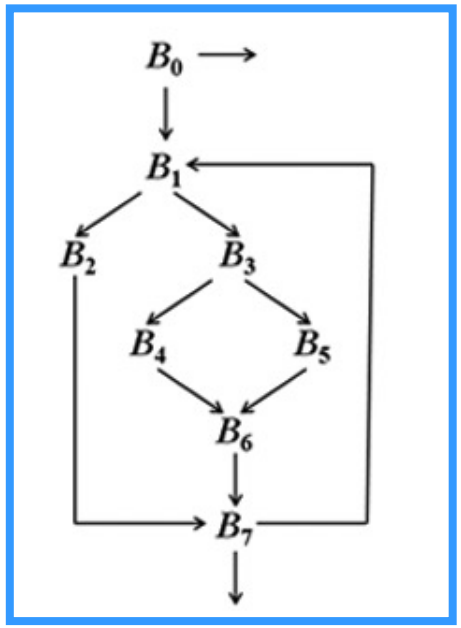
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG

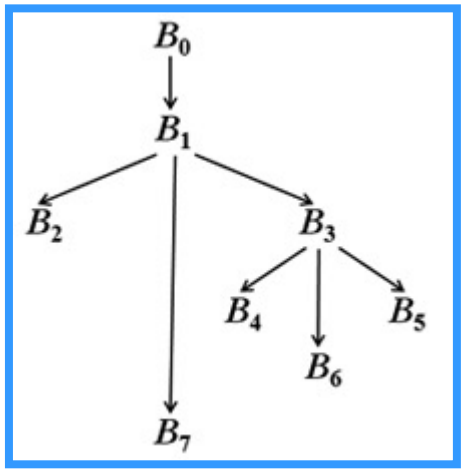
```
B3   a4 ←
     d4 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	5	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_3):

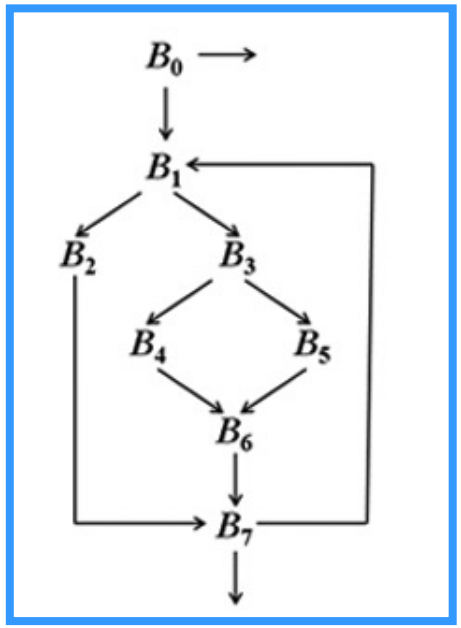
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Rename потомков в дереве доминаторов

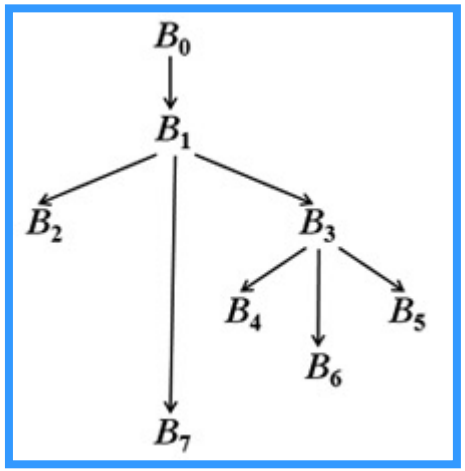
```
B3   a4 ←
     d4 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	5	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_1):

- ***Rename***(B_2) // Done
- ***Rename***(B_7) // Done
- ***Rename***(B_3)
  - ***Rename***(B_4)

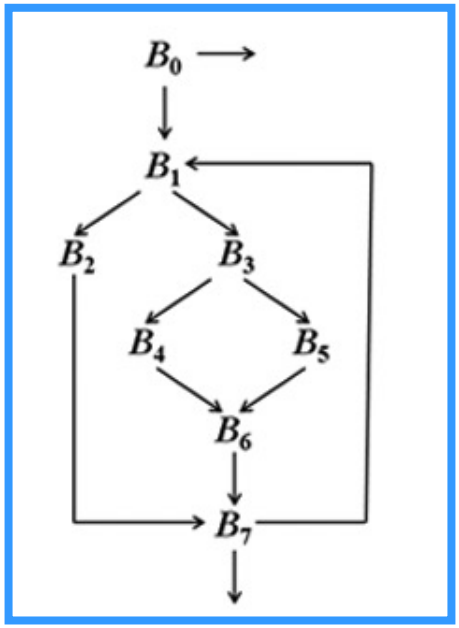
B_3 $a_4 \leftarrow$

$d_4 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow 1$	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$	B_7	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$		$b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$		$c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$
	$d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$		$d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$
	$i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$		$y \leftarrow +, a_3, b_4$
	$a_2 \leftarrow$		$z \leftarrow +, c_3, d_3$
	$b_2 \leftarrow$		$i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$	B_3	$a_4 \leftarrow$
	$c_2 \leftarrow$		$d_4 \leftarrow$
	$d_2 \leftarrow$		
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c, c)$
			$d \leftarrow \varphi(d, d)$
			$b \leftarrow$

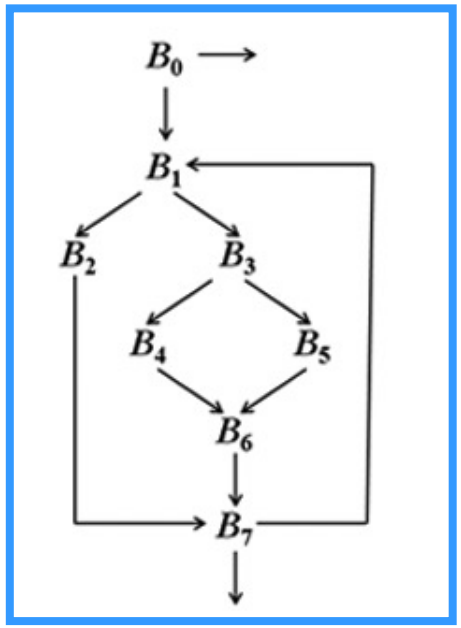


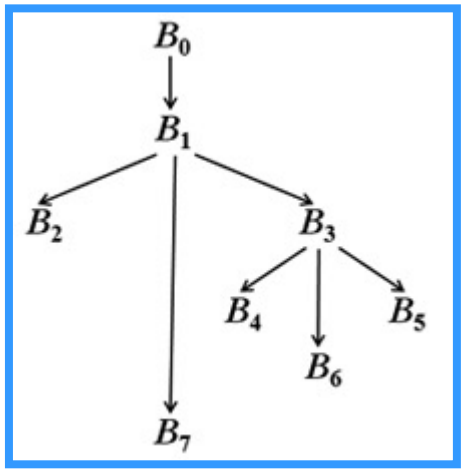
a	b	c	d	i
5	5	4	5	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_4	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	4	5	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_4):

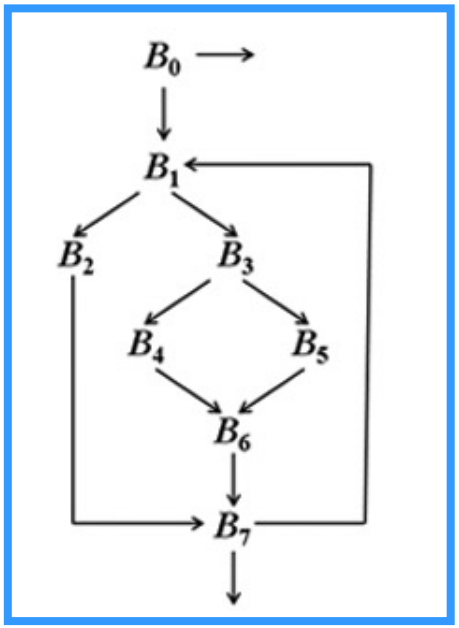
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

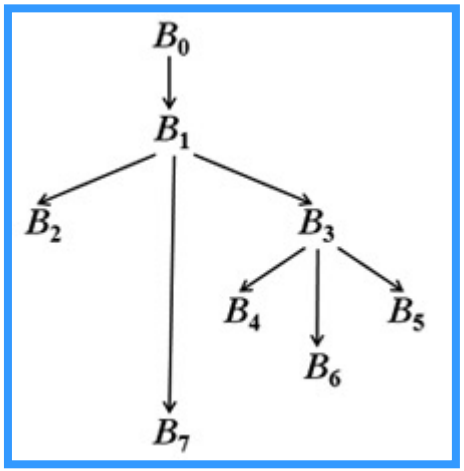
B_4	d ←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_4	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4			d_5	





Rename(B_4):

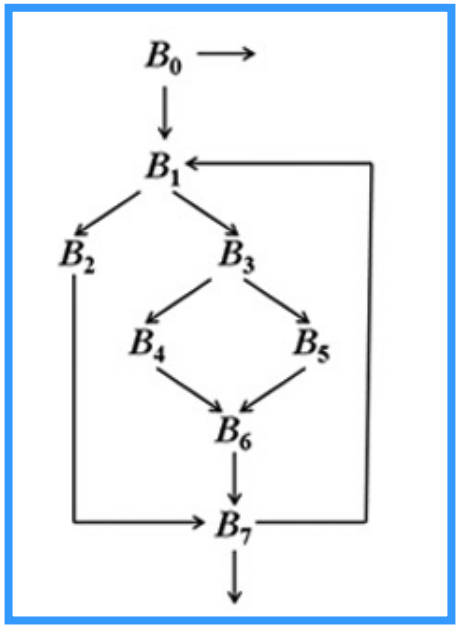
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG

B_4 $d_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow 1$	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$	B_7	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$		$b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$		$c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$
	$d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$		$d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$
	$i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$		$y \leftarrow +, a_3, b_4$
	$a_2 \leftarrow$		$z \leftarrow +, c_3, d_3$
	$b_2 \leftarrow$		$i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$	B_3	$a_4 \leftarrow$
	$c_2 \leftarrow$		$d_4 \leftarrow$
	$d_2 \leftarrow$		
B_4	$d_5 \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c_1, c)$
			$d \leftarrow \varphi(d_5, d)$
			$b \leftarrow$

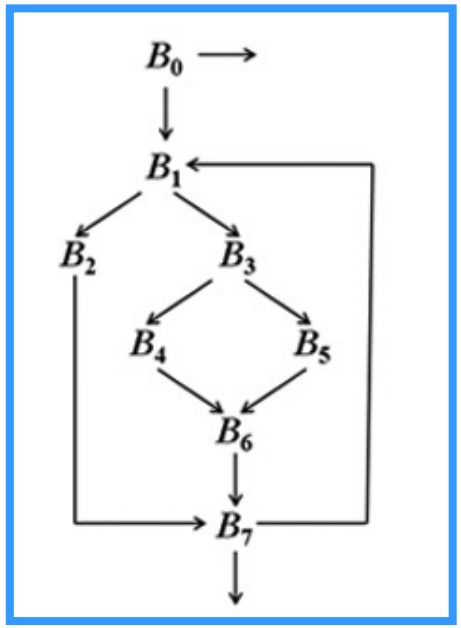


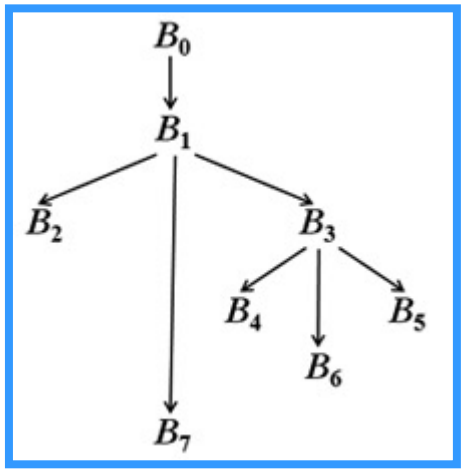
a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	5	4	6	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4			d_5	

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_4	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4			d_5	





Rename(B_4):

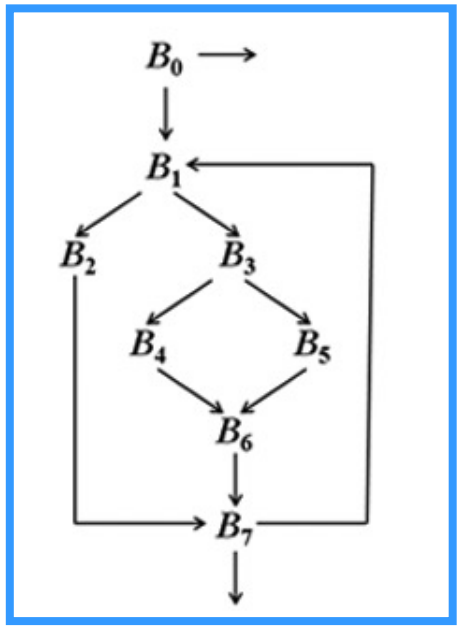
1. Переименование φ−функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_3

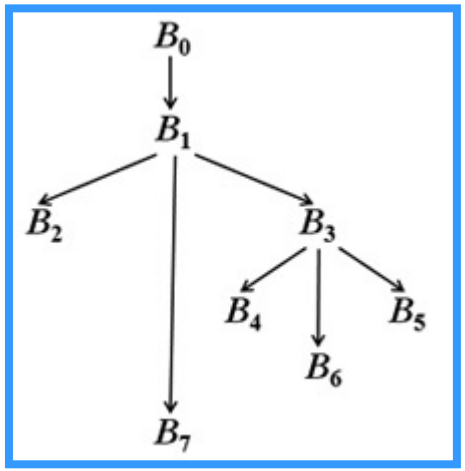
B_4 $d_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_4	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_4):

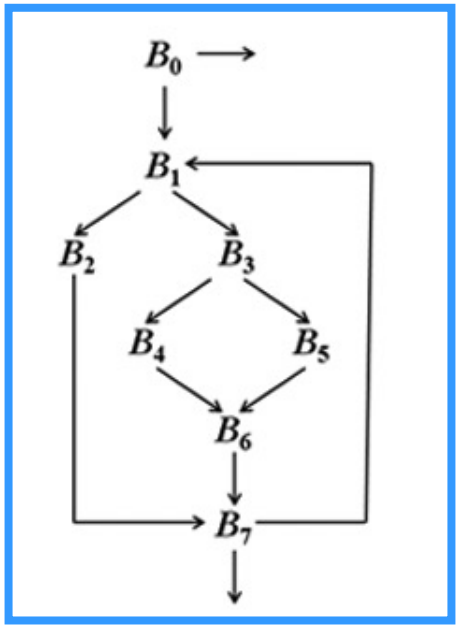
1. Переименование φ−функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_3

B_4 $d_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow$ 1	B_5	$c \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$	B_7	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$		$b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$		$c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$
`	$d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$		$d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$
	$i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$		$y \leftarrow +, a_3, b_4$
	$a_2 \leftarrow$		$z \leftarrow +, c_3, d_3$
	$b_2 \leftarrow$		$i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$	B_3	$a_4 \leftarrow$
	$c_2 \leftarrow$		$d_4 \leftarrow$
	$d_2 \leftarrow$		
B_4	$d_5 \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c_1, c)$
			$d \leftarrow \varphi(d_5, d)$
			$b \leftarrow$

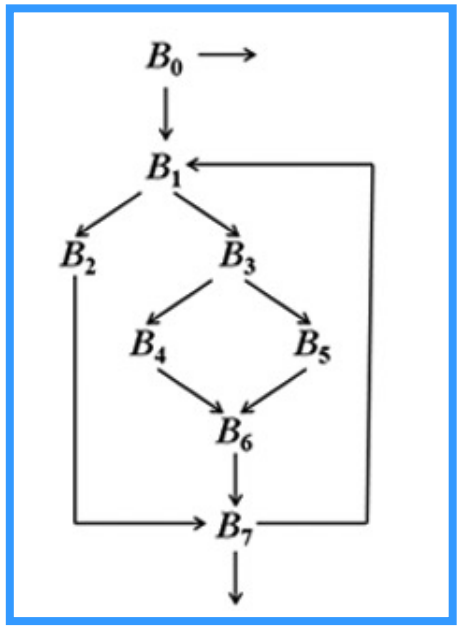


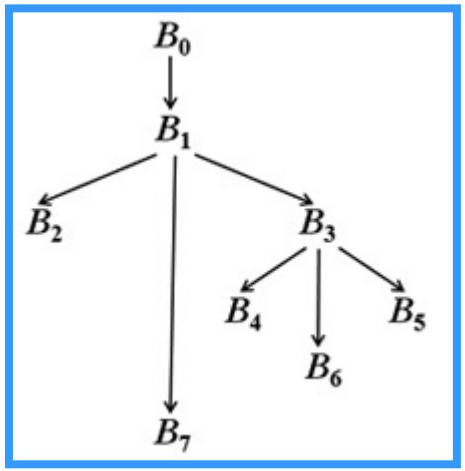
a	b	c	d	i
5	5	4	6	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_1):

- ***Rename***(B_2) // Done
- ***Rename***(B_7) // Done
- ***Rename***(B_3)
  - ***Rename***(B_4)
  - ***Rename***(B_6)

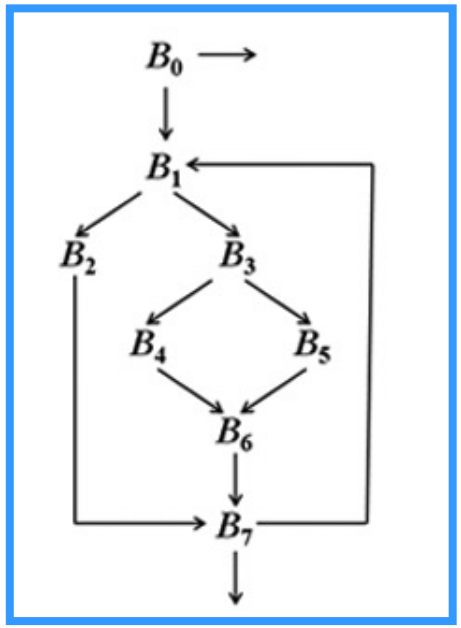
B_3 $a_4 \leftarrow$

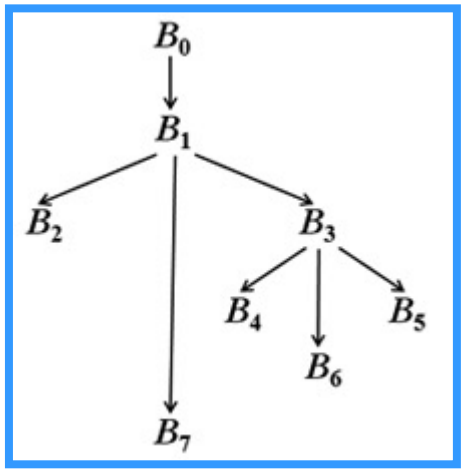
$d_4 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_6):

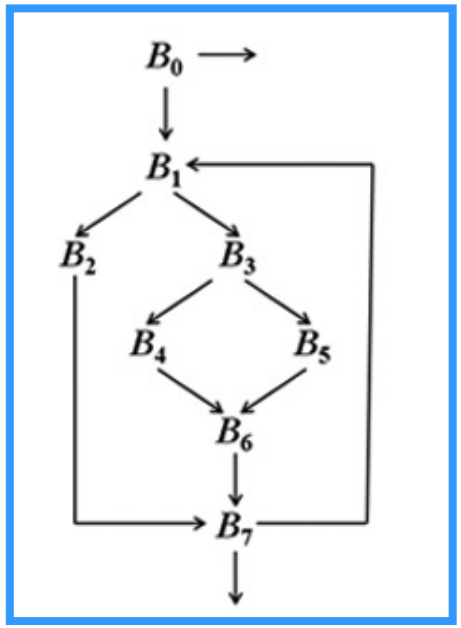
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

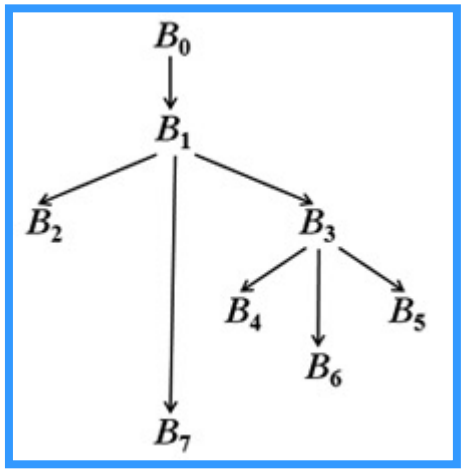
B_6	$c \leftarrow \varphi(c_1, c)$
	$d \leftarrow \varphi(d_5, d)$
	$b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	5	6	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_4	d_4	
	a_4				





Rename(B_6):

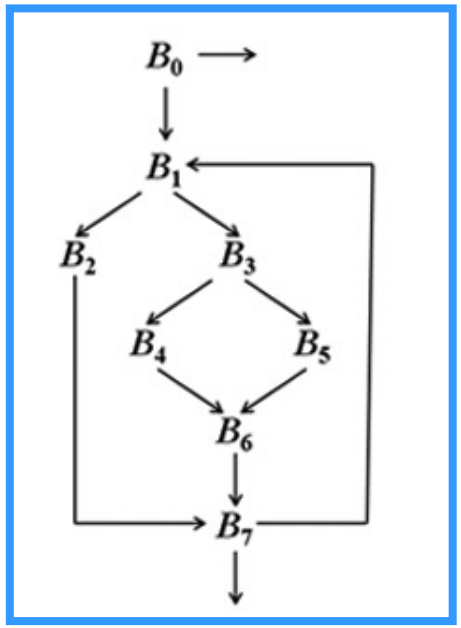
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

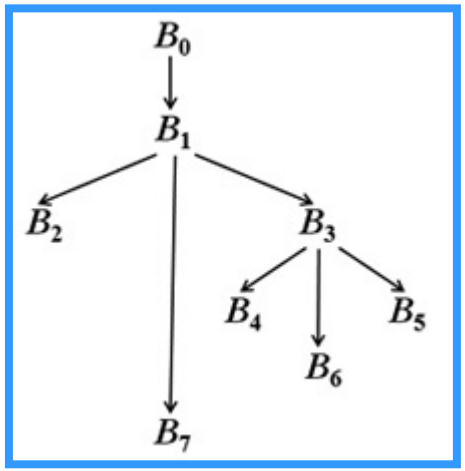
```
B6   c4 ← φ( c1 , c )
     d ← φ( d5 , d )
     b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	5	5	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_4	d_4	
	a_4			d_6	





Rename(B_6):

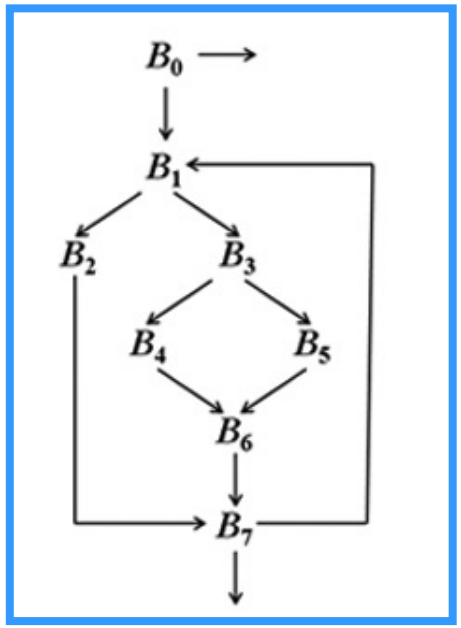
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

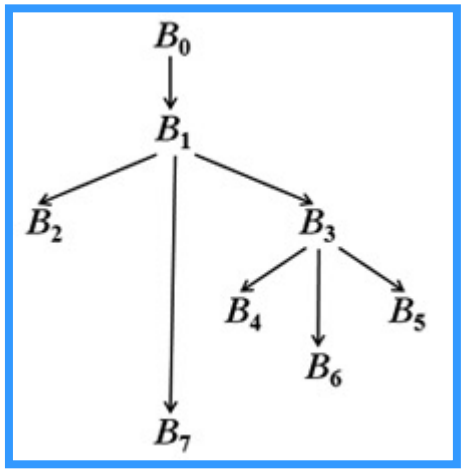
```
B6   c4 ← φ( c1 , c )
     d6 ← φ( d5 , d )
     b ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	5	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_4	d_4	
	a_4	b_5		d_6	





Rename(B_6):

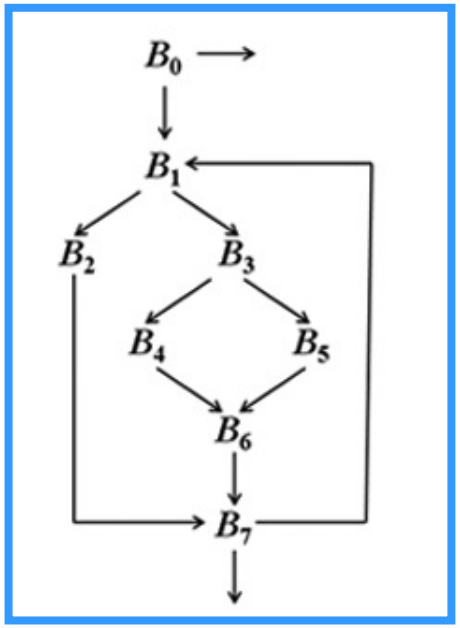
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG

```
B6   c4 ← φ( c1 , c )
     d6 ← φ( d5 , d )
     b5 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0 $i_0 \leftarrow 1$	B_5 $c \leftarrow$
B_1 $a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7 $a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2 $b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3 $a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4 $d_5 \leftarrow$	B_6 $c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d)$ $b_5 \leftarrow$

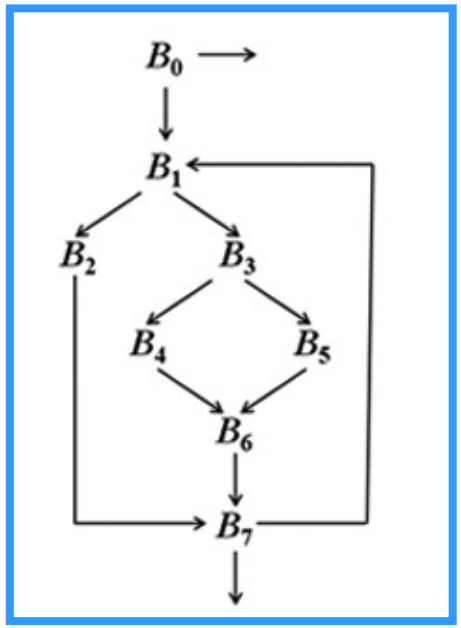


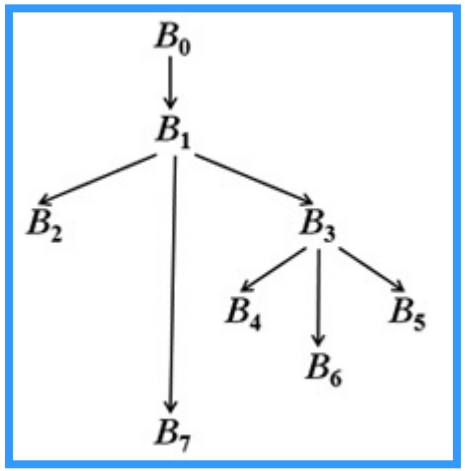
a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	6	5	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2	c_4	d_4	
a_4	b_5		d_6	

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	6	5	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_6):

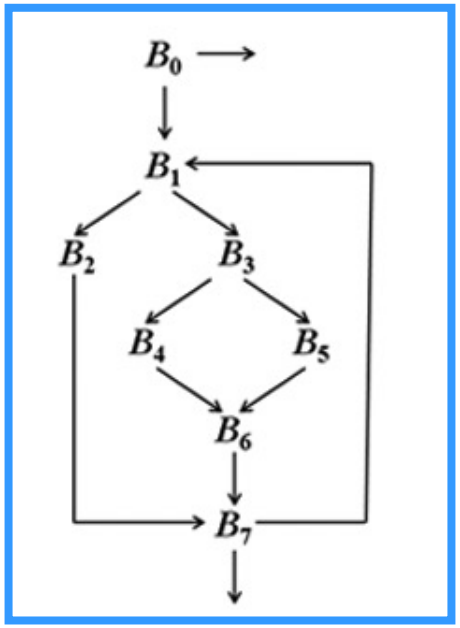
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_3

```
B6   c4 ← φ( c1 , c )
     d6 ← φ( d5 , d )
     b5 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0 $i_0 \leftarrow 1$	B_5 $c \leftarrow$
B_1 $a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7 $a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2 $b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3 $a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4 $d_5 \leftarrow$	B_6 $c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d)$ $b_5 \leftarrow$

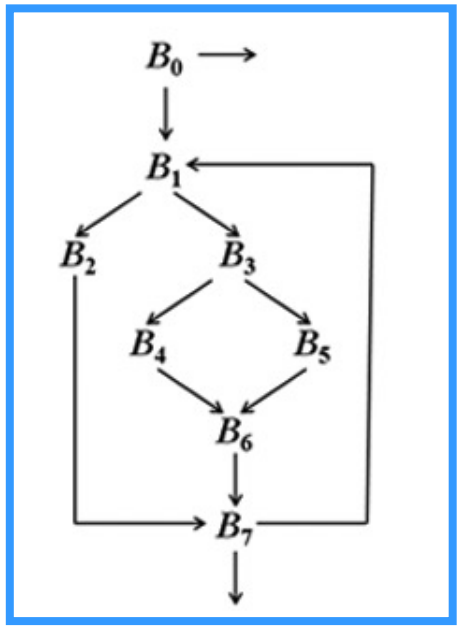


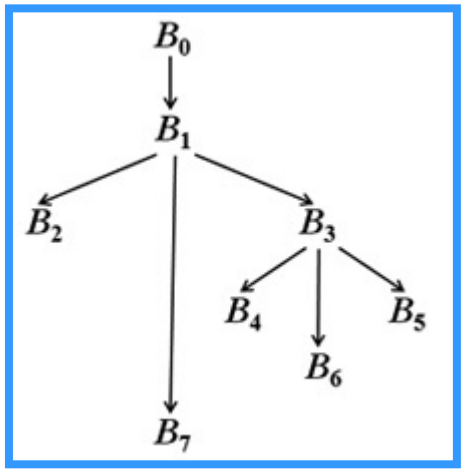
a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	6	5	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	6	5	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_1):

- ***Rename***(B_2) // Done
- ***Rename***(B_7) // Done
- ***Rename***(B_3)
  - ***Rename***(B_4)
  - ***Rename***(B_6)
  - ***Rename***(B_5)

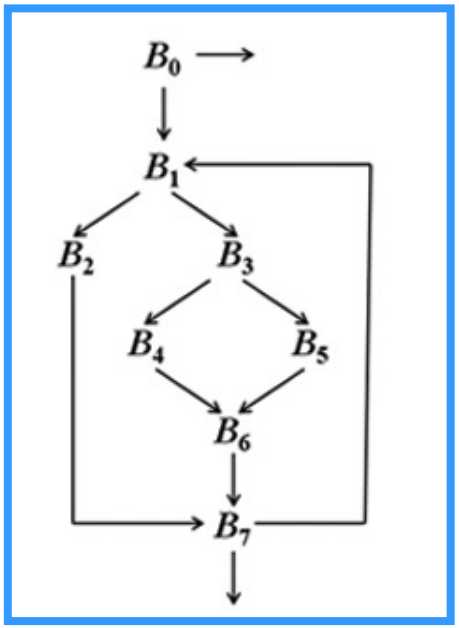
B_3 $a_4 \leftarrow$

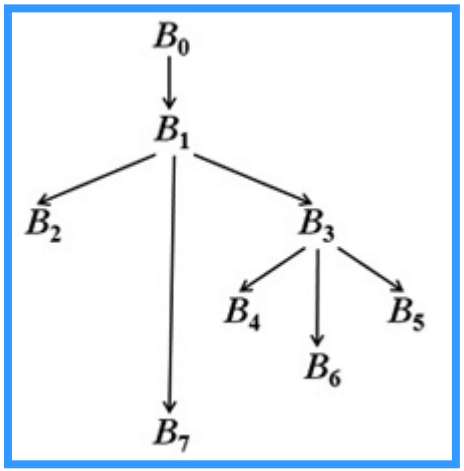
$d_4 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_5	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	6	5	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_5):

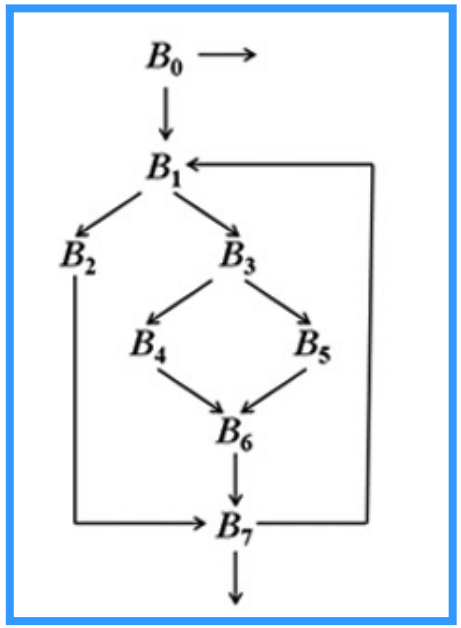
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда

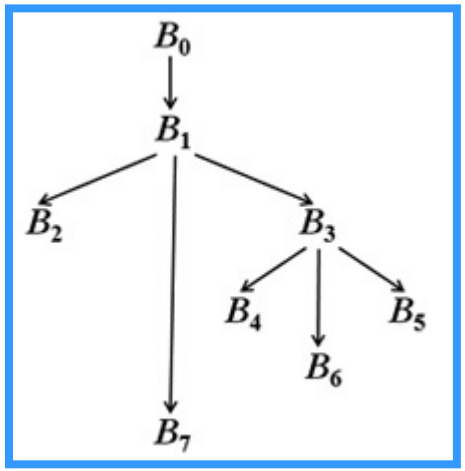
B_5	c ←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_5	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2	c_5	d_4	
	a_4				





Rename(B_5):

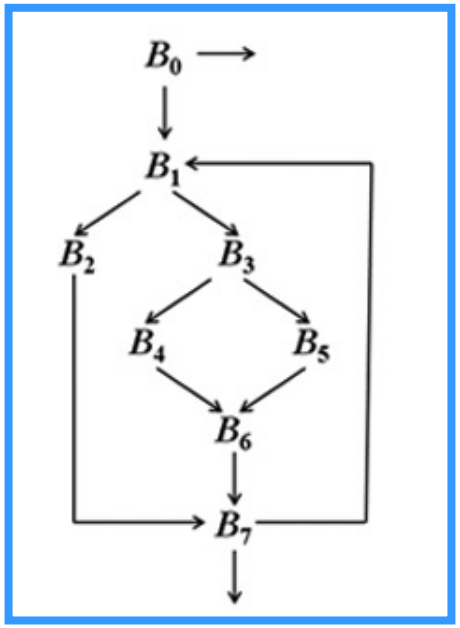
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG

B_5 $c_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	$i_0 \leftarrow$ 1	B_5	$c_5 \leftarrow$
B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$	B_7	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$		$b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$		$c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$
`	$d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$		$d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$
	$i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$		$y \leftarrow +, a_3, b_4$
	$a_2 \leftarrow$		$z \leftarrow +, c_3, d_3$
	$b_2 \leftarrow$		$i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2	$b_3 \leftarrow$	B_3	$a_4 \leftarrow$
	$c_2 \leftarrow$		$d_4 \leftarrow$
	$d_2 \leftarrow$		
B_4	$d_5 \leftarrow$	B_6	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$
			$d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$
			$b_5 \leftarrow$

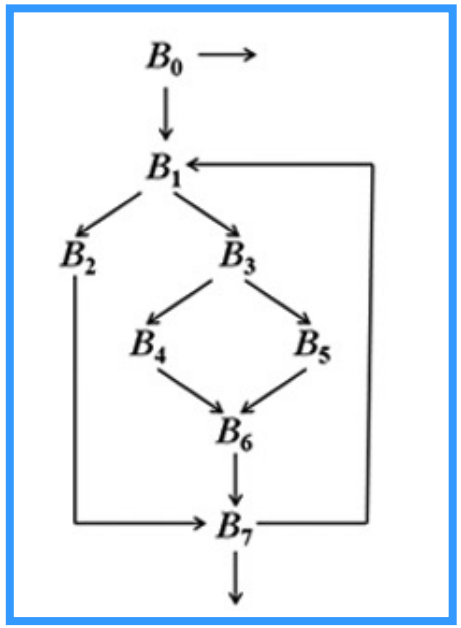


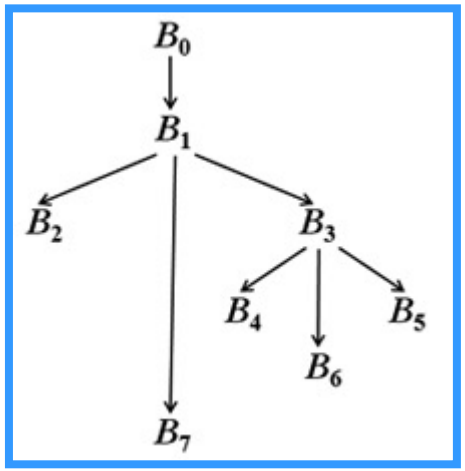
a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	6	6	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2	c_5	d_4	
a_4				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_5	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_5):

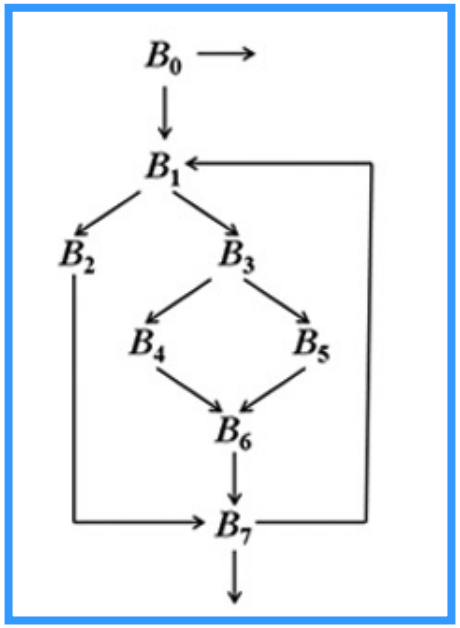
1. Переименование φ−функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. ***return*** // -> B_3

B_5 $c_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0 $i_0 \leftarrow 1$	B_5 $c_5 \leftarrow$
B_1 $a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7 $a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2 $b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3 $a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4 $d_5 \leftarrow$	B_6 $c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

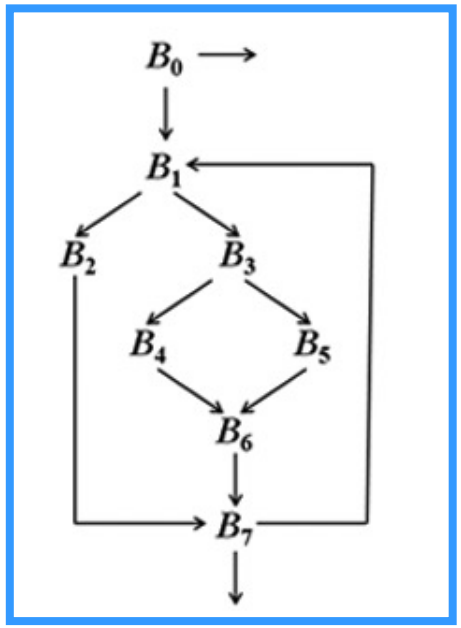


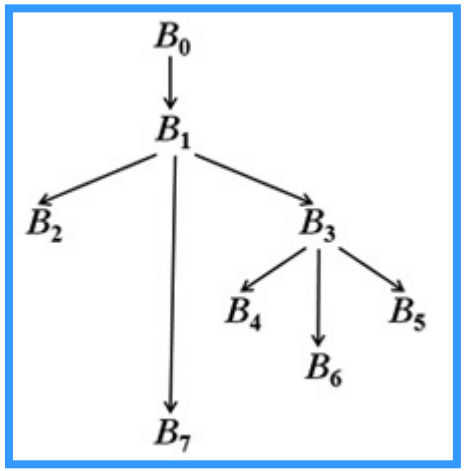
a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	6	6	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2		d_4	
	a_4				





Rename(B_1):

- ***Rename***(B_2) // Done
- ***Rename***(B_7) // Done
- ***Rename***(B_3)
  - ***Rename***(B_4)
  - ***Rename***(B_6)
  - ***Rename***(B_5)

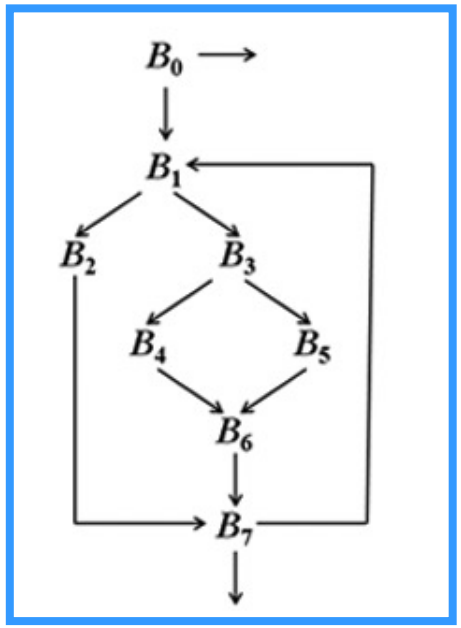
B_3 $a_4 \leftarrow$

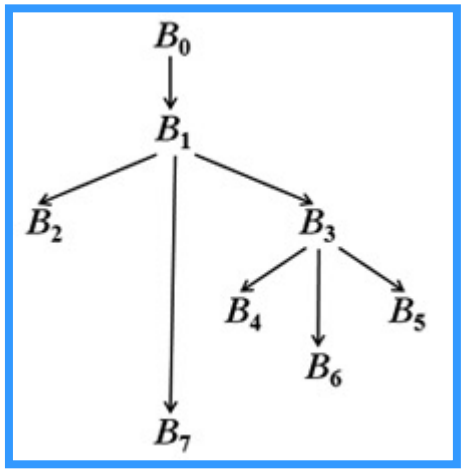
$d_4 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	*a*	*b*	*c*	*d*	*i*
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			





Rename(B_3):

1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Rename потомков в в дереве дом.
5. Очистка стека. ***return*** B_1

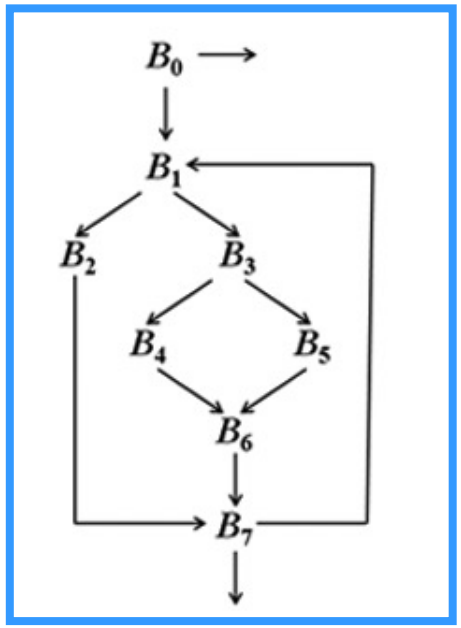
B_3 $a_4 \leftarrow$

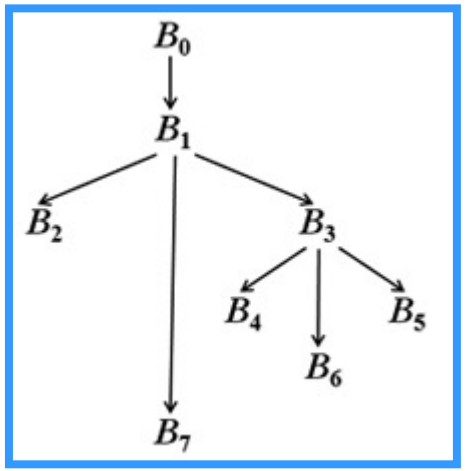
$d_4 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0





Rename(B_1):

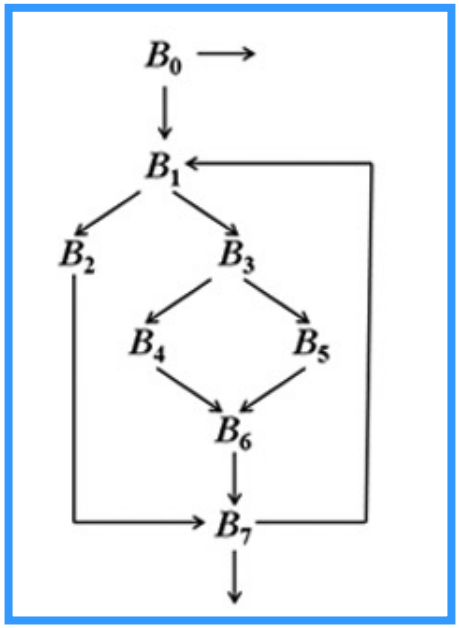
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Rename потомков в в дереве дом.
5. Очистка стека. ***return*** B_0

```
B1  a1 ← φ( a0 , a3 )
    b1 ← φ( b0 , b4 )
    c1 ← φ( c0 , c3 )
    d1 ← φ( d0 , d3 )
    i1 ← φ( i0 , i2 )
    a2 ←
    b2 ←
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0 $i_0 \leftarrow 1$	B_5 $c_5 \leftarrow$
B_1 $a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7 $a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2 $b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3 $a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4 $d_5 \leftarrow$	B_6 $c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

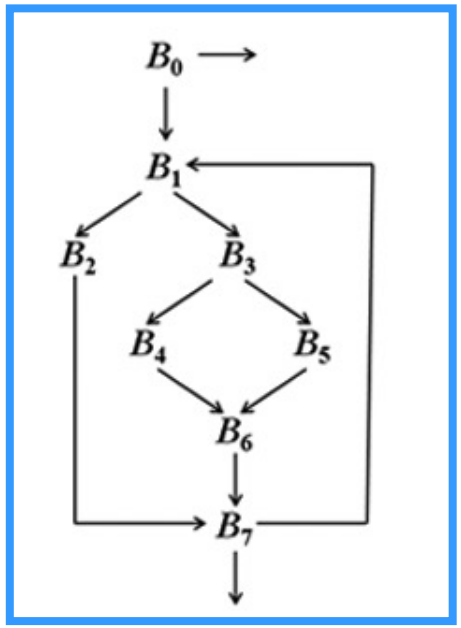


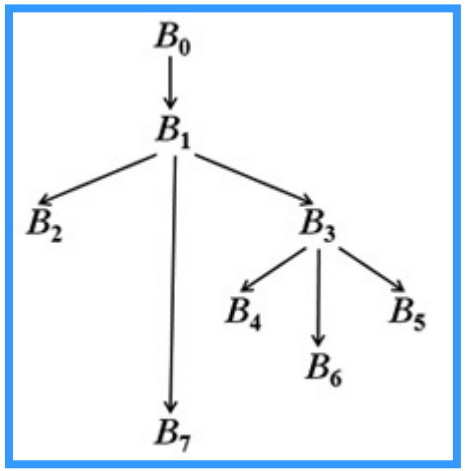
a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	6	6	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (↓)	a_0	b_0	c_0	d_0	





Rename(B_0):

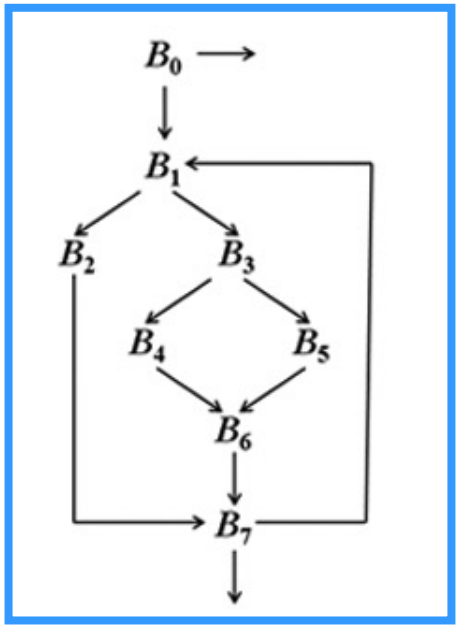
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
   1. Переименование операндов
   2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG
4. Rename потомков в в дереве дом.
5. Очистка стека. ***return***

```
B0   i0 ←     1
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_0 $i_0 \leftarrow 1$	B_5 $c_5 \leftarrow$
B_1 $a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7 $a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2 $b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3 $a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4 $d_5 \leftarrow$	B_6 $c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$



a	*b*	*c*	*d*	*i*
5	6	6	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	

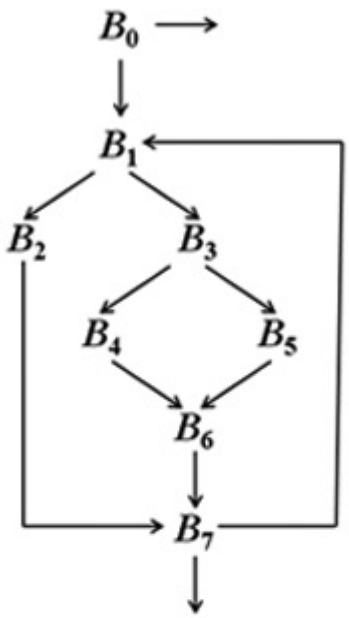
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

Блок B_0

Когда в конце обхода дерева доминаторов управление снова попадает в B_0 $Rename$ выталкивает значение из стека для i и происходит выход из $Rename$.

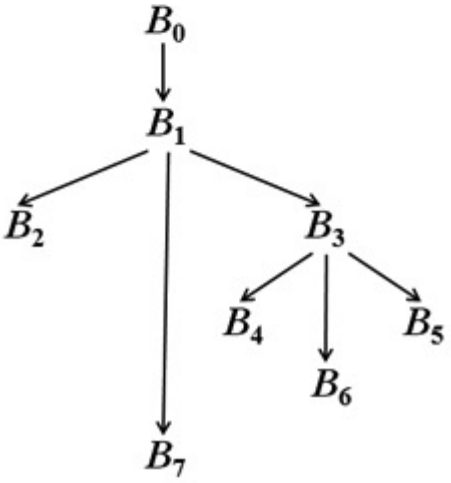
Граф потока управления



Состояние счетчиков и стеков в момент, когда $Rename(B_0)$ уже закончила обрабатывать блок B_0, но еще не удалила имена, связанные с B_0 из соответствующих стеков:

Глобальные переменные	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0

Дерево доминаторов

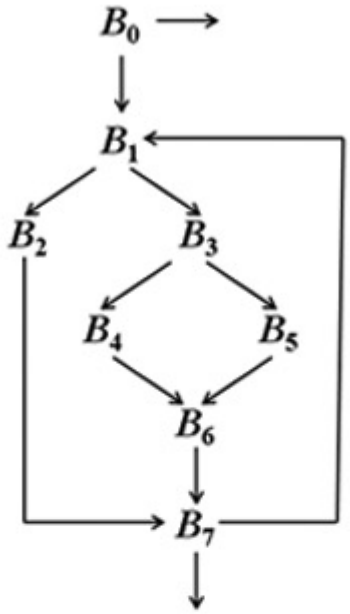


6.3 Построение частично усеченной SSA-формы
6.3.4. Переименование переменных

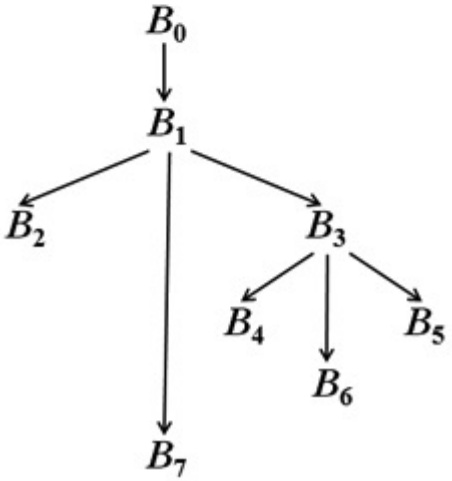
После окончания работы алгоритма получим

B_0 $i_0 \leftarrow$ 1	B_5 $c_5 \leftarrow$
B_1 $a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B_7 $a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B_2 $b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B_3 $a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4 $d_5 \leftarrow$	B_6 $c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

Граф потока управления



Дерево доминаторов



6.4 Восстановление кода из SSA-формы

6.4.1. Постановка задачи

- ◊ Поскольку современные процессоры не выполняют φ-функций, компилятор должен перевести программу в SSA-форме в выполняемый код.
- ◊ Рассмотрение примеров наводит на мысль, что **компилятору достаточно попросту опустить индексы имен и удалить φ-функции**.
  Такой возврат к обычной форме будет корректным только сразу же после перехода в SSA-форму, но будет уже некорректным после выполнения оптимизаций, при которых могут появиться несколько *одновременно живых* переменных с разными индексами и одним базовым именем.
- ◊ Простое переименование с помощью «отбрасывания» индексов **может привести к некорректному коду**.

6.4 Восстановление кода из SSA-формы

6.4.1. Постановка задачи

◊ **Пример**. Внизу слева показан базовый блок из четырех команд и его оптимизация с помощью ЛНЗ над исходными именами.
Справа показан тот же самый пример с использованием SSA-имен.

Вследствие того, что исходное имя a имеет разные SSA-имена a_0 и a_1, удалось оптимизировать последнее присваивание.

Заметим однако, что если у имен опустить индексы, получится некорректный код: c будет присвоено значение 17.

Исходные имена		***SSA*-имена**	
a ← +, x, y	a ← +, x, y	a_0 ← +, x_0, y_0	a_0 ← +, x_0, y_0
b ← +, x, y	b ← a	b_0 ← +, x_0, y_0	b_0 ← a_0
a ← 17	a ← 17	a_1 ← 17	a_1 ← 17
c ← +, x, y	c ← +, x, y	c_0 ← +, x_0, y_0	c_0 ← a_0

6.4 Восстановление кода из SSA-формы

6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

◊ Можно оставить SSA-имена неизменными, заменив каждую φ-функцию группой команд копирования (по одной для каждого входного ребра), предоставив разбираться с именами оптимизирующему преобразованию «Распространение копий».

В рассматриваемом примере при удалении φ-функций будет:

```
B7  a4 ← φ(a2, a3)
    b4 ← φ(b2, b3)
    c6 ← φ(c3, c5)
    d6 ← φ(d2, d5)
    y  ← +, a4, b4
    z  ← +, c6, d6
    i2 ← +, i1, 1
```

```
B6  c5 ← φ(c2, c4)
    d5 ← φ(d4, d3)
    b3 ←
```

```
B2  b2 ←
    c3 ←
    d2 ←
```

```
B7  y  ← +, a4, b4
    z  ← +, c6, d6
    i2 ← +, i1, 1
```

```
B6  b3 ←
    a4 ← a2
    b4 ← b2
    c6 ← c3
    d6 ← d2
```

```
B2  b2 ←
    c3 ←
    d2 ←
    a4 ← a3
    b4 ← b3
    c6 ← c5
    d6 ← d5
```

6.4 Восстановление кода из SSA-формы

6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

```
B7   a4 ← φ(a2, a3)
     b4 ← φ(b2, b3)
     c6 ← φ(c3, c5)
     d6 ← φ(d2, d5)
     y  ← +, a4, b4
     z  ← +, c6, d6
     i2 ← +, i1, 1
```

```
B6   c5 ← φ(c2, c4)
     d5 ← φ(d4, d3)
     b3 ←
```

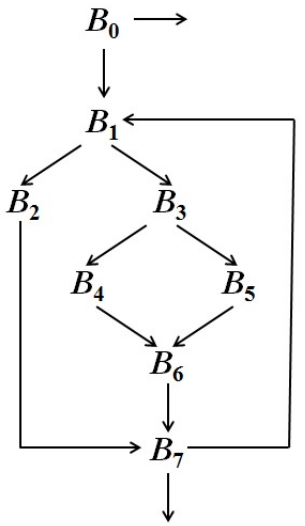
```
B2   b2 ←
     c3 ←
     d2 ←
```

```
B7   y  ← +, a4, b4
     z  ← +, c6, d6
     i2 ← +, i1, 1
```

```
B6   b3 ←
     a4 ← a2
     b4 ← b2
     c6 ← c3
     d6 ← d2
```

```
B2   b2 ←
     c3 ←
     d2 ←
     a4 ← a3
     b4 ← b3
     c6 ← c5
     d6 ← d5
```

- ◊ Удаление φ-функций из блока B_6 породит инструкции копирования в блоках B_4 и B_5.
- ◊ Удаление φ-функций из блока B_1 должно породить инструкции копирования в блоках B_0 и B_7. Но этого делать нельзя!



6.4 Восстановление кода из SSA-формы

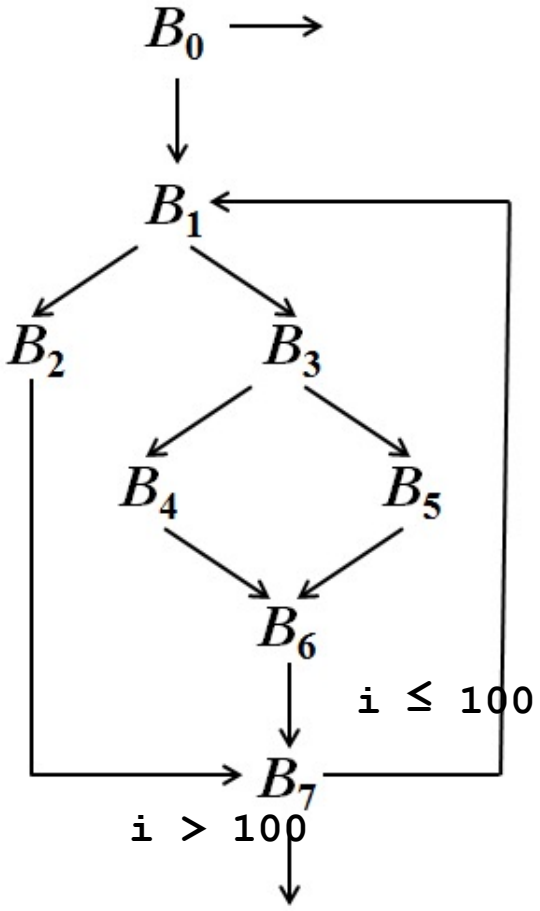
6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

◊ Удаление φ-функций из блока B_1 должно породить инструкции копирования в блоках B_0 и B_7.

Но этого делать нельзя! Почему?

◊ У блоков B_0 и B_7 по два последующих блока (вторые блоки не попали на схему, так как они находятся вне анализируемого цикла).

Если вставить копирования в блоки B_0 и B_7, они будут выполняться не только на ребрах, внутри рассматриваемого цикла, но и на ребрах выводящих из цикла.



6.4 Восстановление кода из SSA-формы

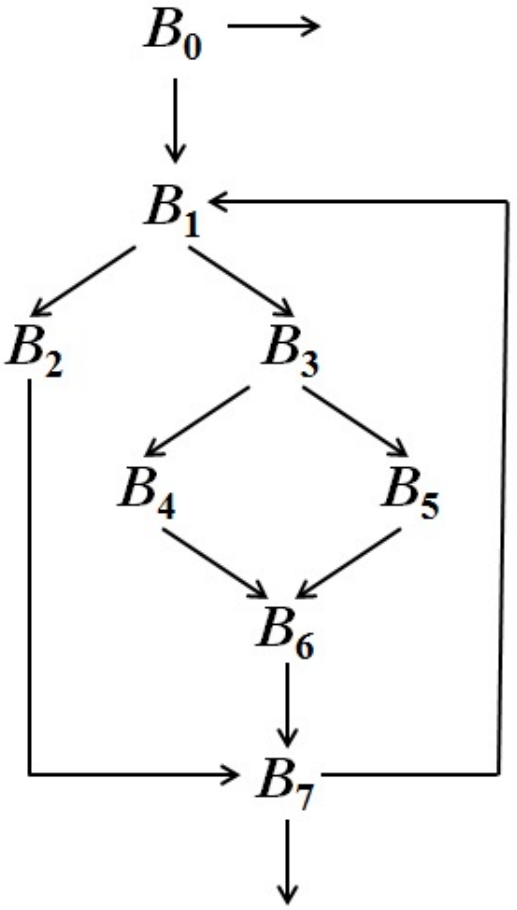
6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

◊ По определению ребро, выходящее из вершины с несколькими потомками, и входящее в вершину с несколькими предками, называется *критическим*.

Ребра ($B_0\ B_1$) и ($B_7\ B_1$) – критические.

◊ Критические ребра обычно исключают, разрывая их, и вставляя в разрыв дополнительные вершины.

◊ Разорвем критические ребра и добавим два новых блока B_8 и B_9, поместив в них требуемые инструкции копирования.



6.4 Восстановление кода из SSA-формы

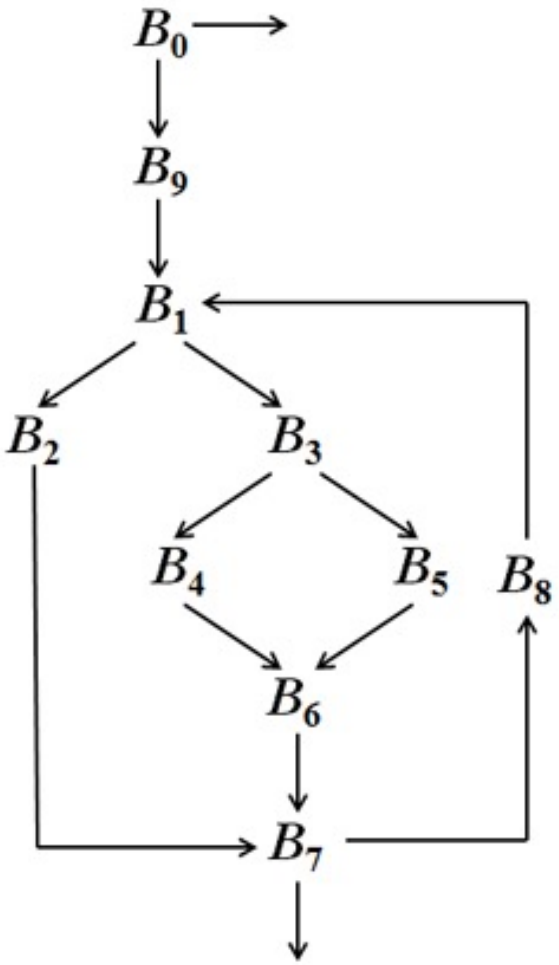
6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

◊ По определению ребро, выходящее из вершины с несколькими потомками, и входящее в вершину с несколькими предками, называется *критическим*.

Ребра ($B_0\ B_1$) и ($B_7\ B_1$) – критические.

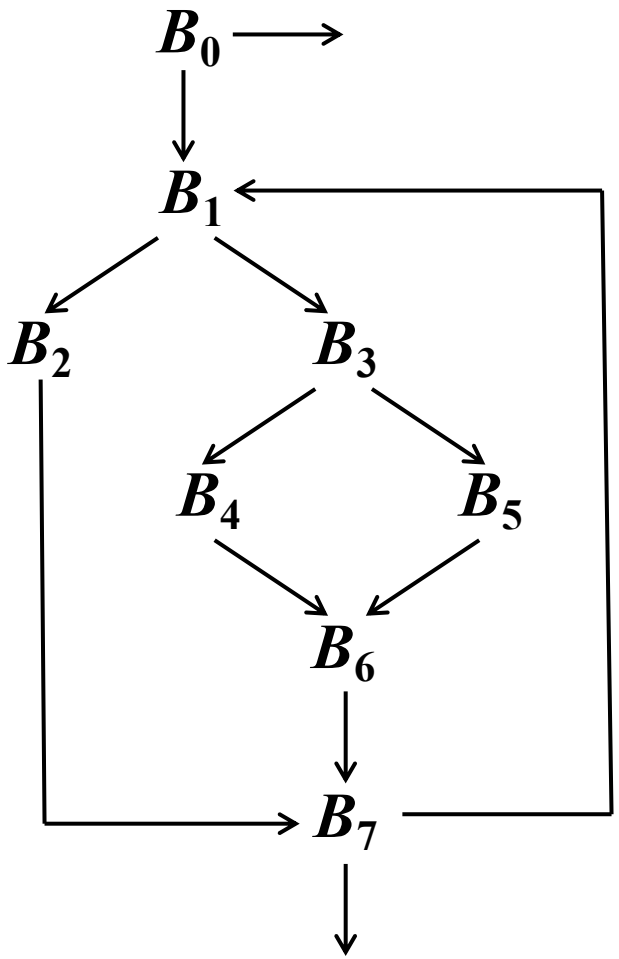
◊ Критические ребра обычно исключают, разрывая их, и вставляя в разрыв дополнительные вершины.

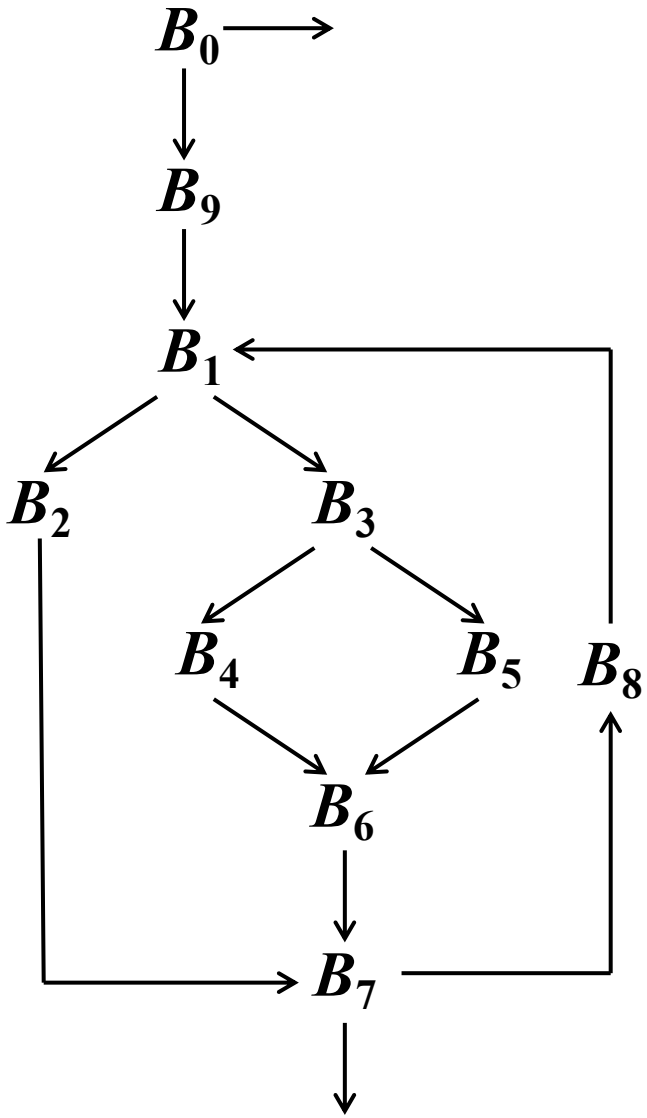
◊ Разорвем критические ребра и добавим два новых блока B_8 и B_9, поместив в них требуемые инструкции копирования.



6.4 Восстановление кода из SSA-формы

6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

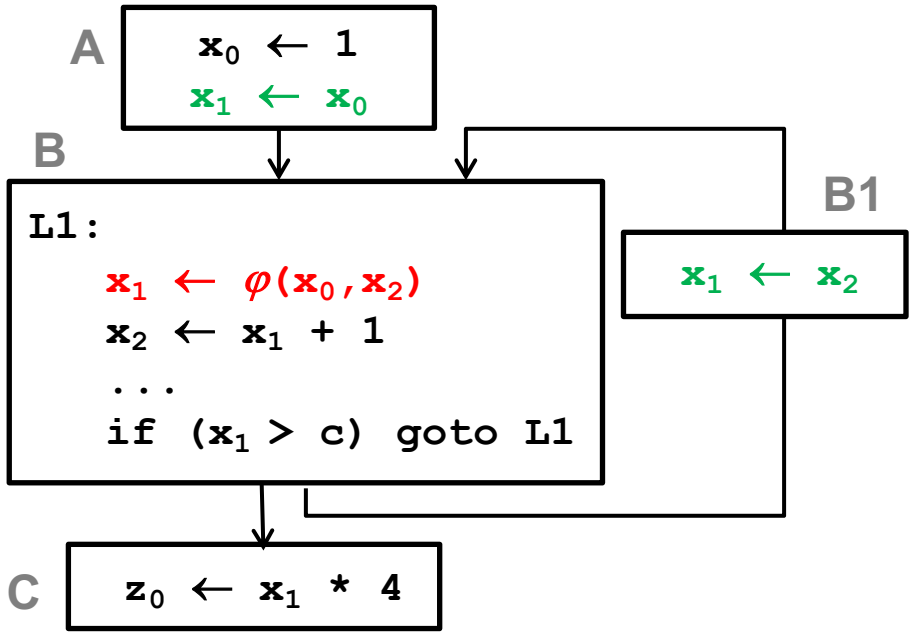




6.4 Восстановление кода из SSA-формы

6.4.2. Замена φ-функций группами инструкций копирования

При удалении φ-функции из блока (**B**), в который входит критическая дуга, операция копирования должна быть добавлена в новом блоке (**B1**), созданном на той дуге, по которой приходит соответствующий аргумент. Добавлять копирование $x_1 \leftarrow x_2$ просто в конец предка, из которого исходит дуга (**B**), некорректно:



- Копирование из **B1** нельзя вставить в конец **B** после `if`, т.к. базовый блок должен заканчиваться переходом. Кроме того, в блоке **C** используется значение x_1, которое копирование перезапишет.
- Копирование из **B1** нельзя вставить в конец **B** перед `if`, т.к. x_1 читается в условии перехода.

В данном примере в `if` и **C** используется не самое последнее определение **x** (x_1 а не x_2). Такой код не встречается в только что построенном SSA, но может появиться позже в результате оптимизаций.