

**6. 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 в данный момент*).

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 в данный момент*).

Исходная программа Обычное представление Представление в SSA-форме

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



```
foo:
    param a
    b = 0
    b = bar()
    b = a + 3
    b = b + a
```



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

Исходная программа Обычное представление Представление в SSA-форме

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



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



```
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 Обычное представление Представление в SSA-форме

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



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

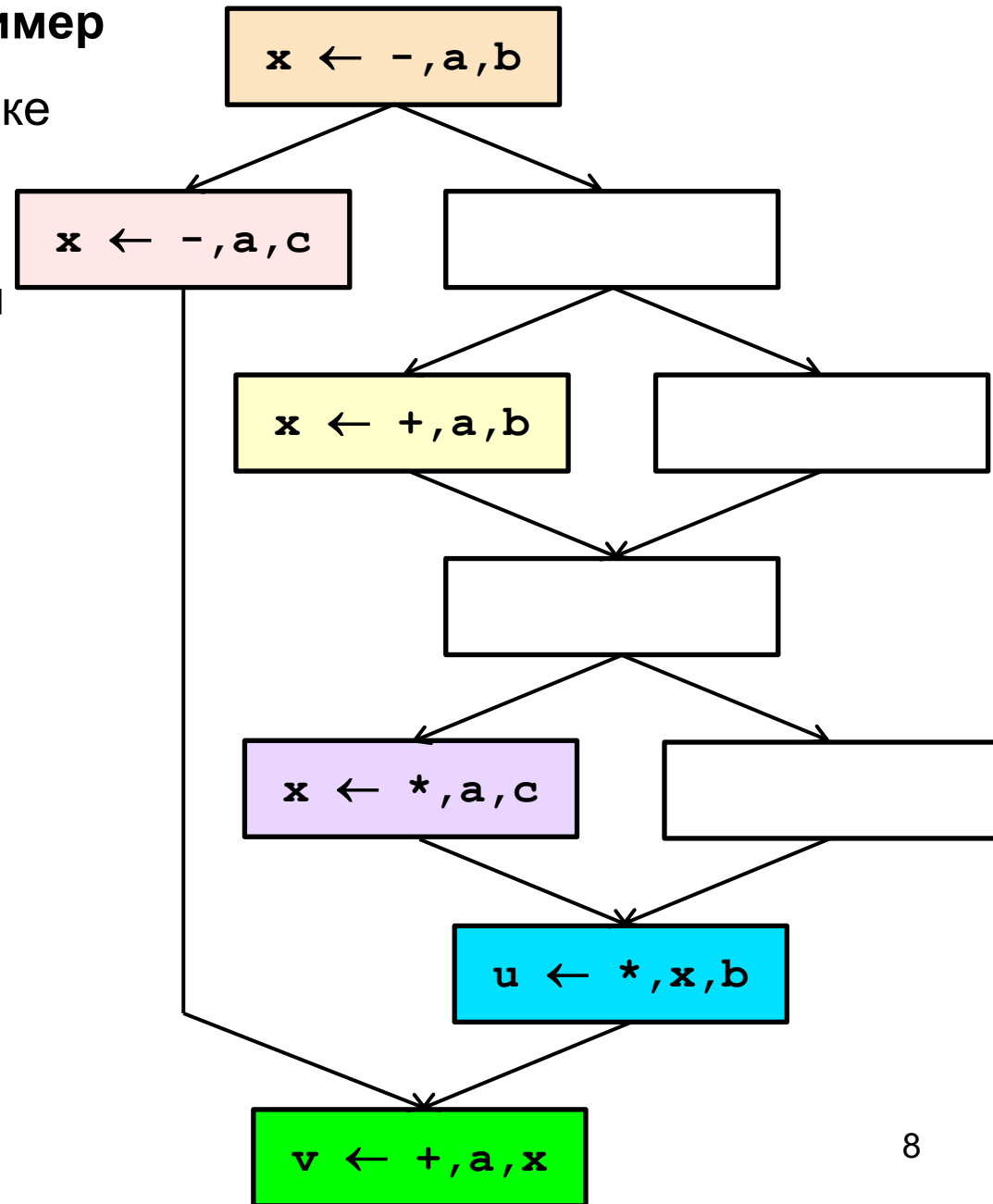


```
foo:
    param a.0
    b.0 = 0
    b.1 = bar()
    b.2 = a.0 + 3
    if (a.0 == 0) goto l1 : l2
l1:
    b.3 = b.2 * 4
l2:
    b.4 = phi(b.2, b.3)
    b.5 = b.4 + a.0
```

6.1 SSA-форма

6.1.1. Постановка задачи. Пример

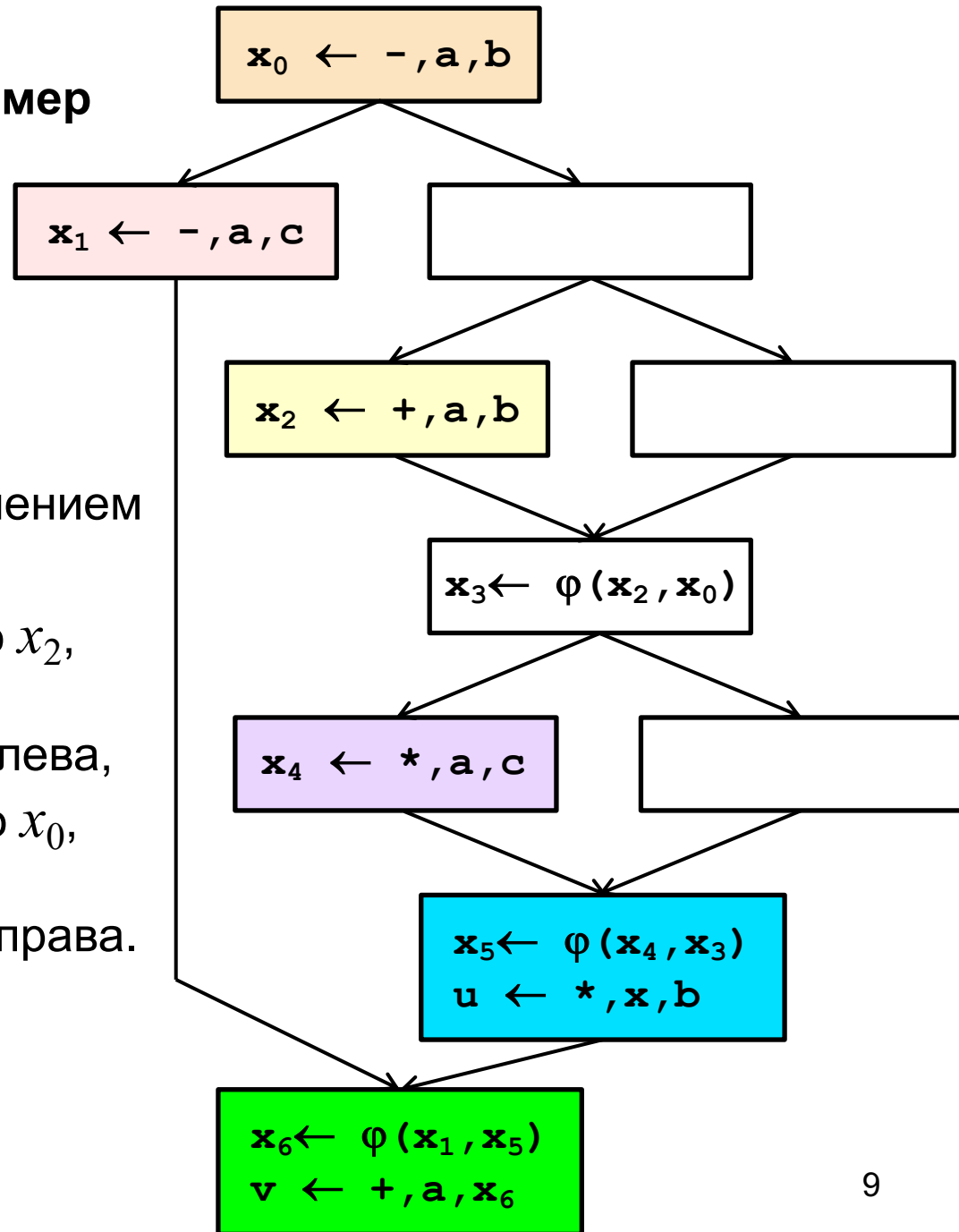
- ◇ Фрагмент ГПУ на рисунке содержит четыре определения **x**
- ◇ Использования в синем блоке достигают три определения **x**, в зеленом – четыре определения **x**
- ◇ Цель же состоит в том, чтобы *каждого использования достигало только одно определение*



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

<pre>x = y = ... while (x < 100) { x = x + 1 y = y + x }</pre>	<pre>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)</pre>
---	---



Затруднение. Первый аргумент $\phi(x_0, x_2)$ определяется в блоке, который предшествует циклу, второй аргумент определяется позже в блоке, содержащем $\phi(x_0, x_2)$. Следовательно, при первом выполнении $\phi(x_0, x_2)$ 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.

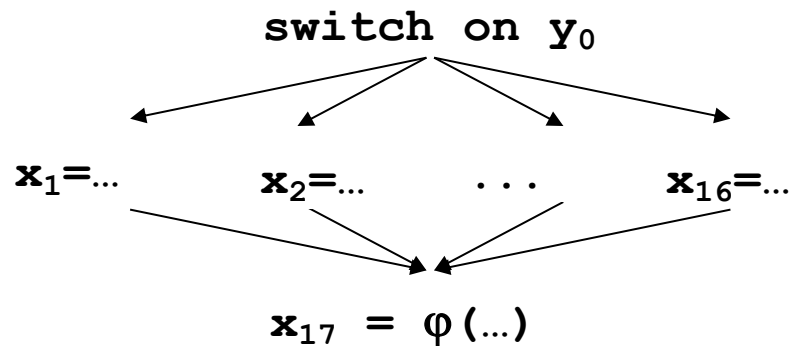
Поэтому φ -функция не прочитает неопределенного значения.

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

6.2.2. Базовый алгоритм построения SSA-формы

- ◇ **Вход:** программа в промежуточном представлении
- ◇ **Выход:** промежуточное представление программы в SSA-форме
- ◇ **Метод:** Выполнить следующие действия:

(1) *Вставить φ -функции:*

в начало каждого блока B , у которого

$|Pred(B)| > 1$ вставить φ -функцию вида

$y = \varphi(y, y, \dots)$ для **каждого** имени y , которое

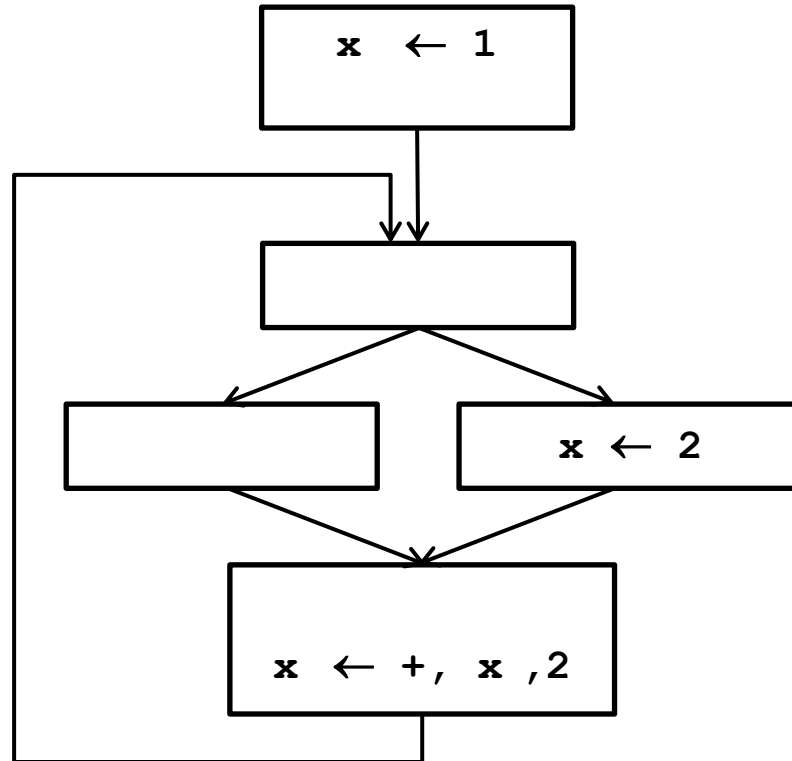
~~либо определяется, либо используется в B .~~
встречается в функции.

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

Порядок вставляемых φ -функций несуществен

6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример



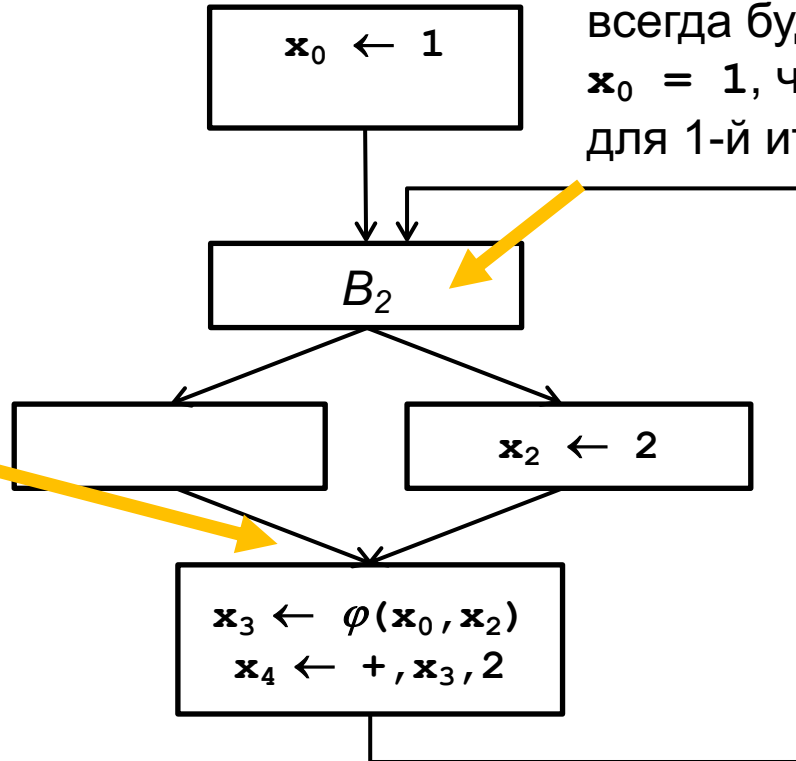
6.2 Построение SSA-формы

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 приходиться $x_0 = 1$, что верно только для 1-й итерации цикла

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



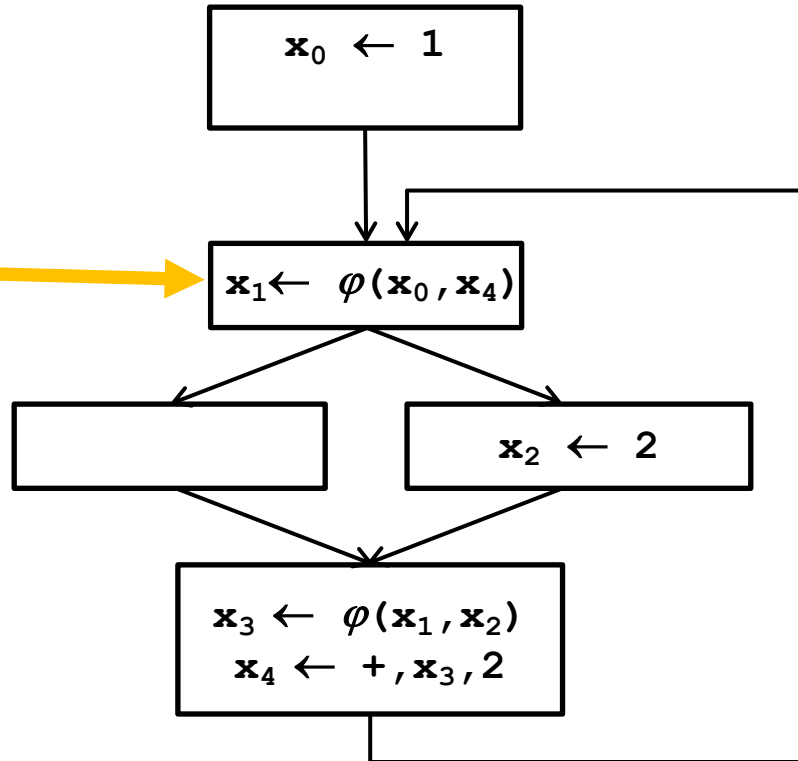
Как можно было избежать этой ошибки: при построении максимальной SSA-формы нужно вставлять ϕ -функции для ВСЕХ переменных процедуры во ВСЕ точки сбора.

6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

(Правильное решение)

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



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 φ -функции:*

в начало каждого блока B , у которого

$|Pred(B)| > 1$ вставить φ -функцию вида

$y = \varphi(y, y, \dots)$ для каждого имени y , которое встречается в функции.

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

Порядок вставляемых φ -функций несущественен.

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.

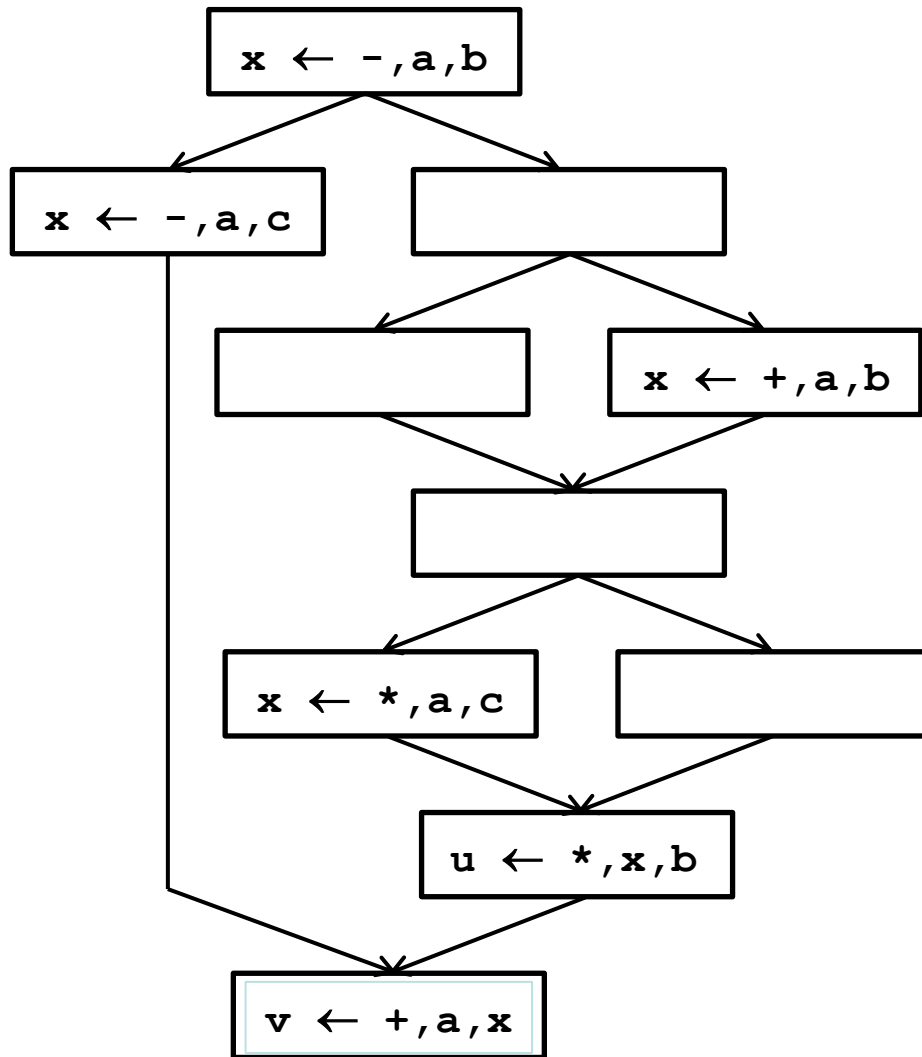
6.2 Построение SSA-формы

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.

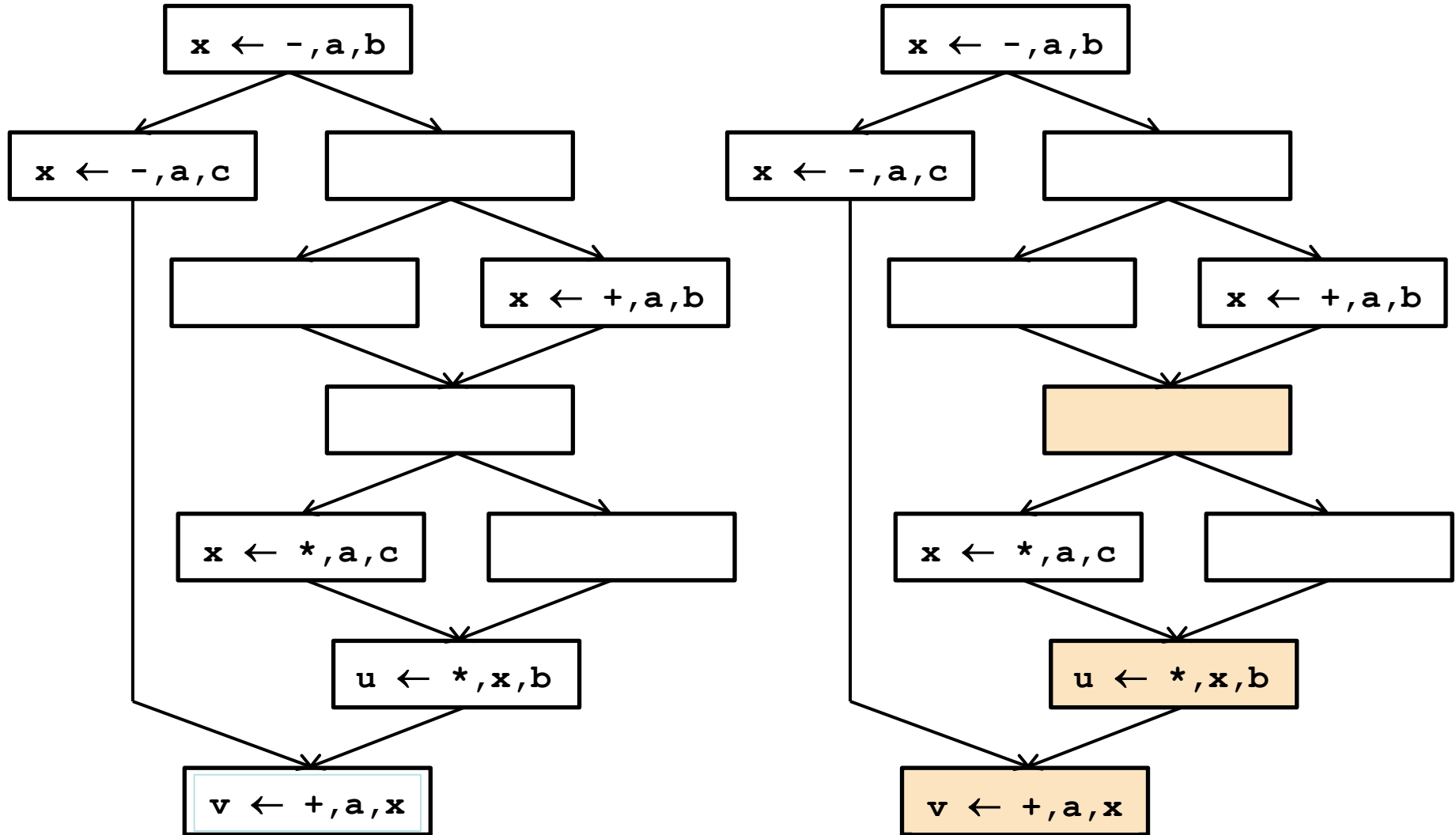
6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример



6.2 Построение SSA-формы

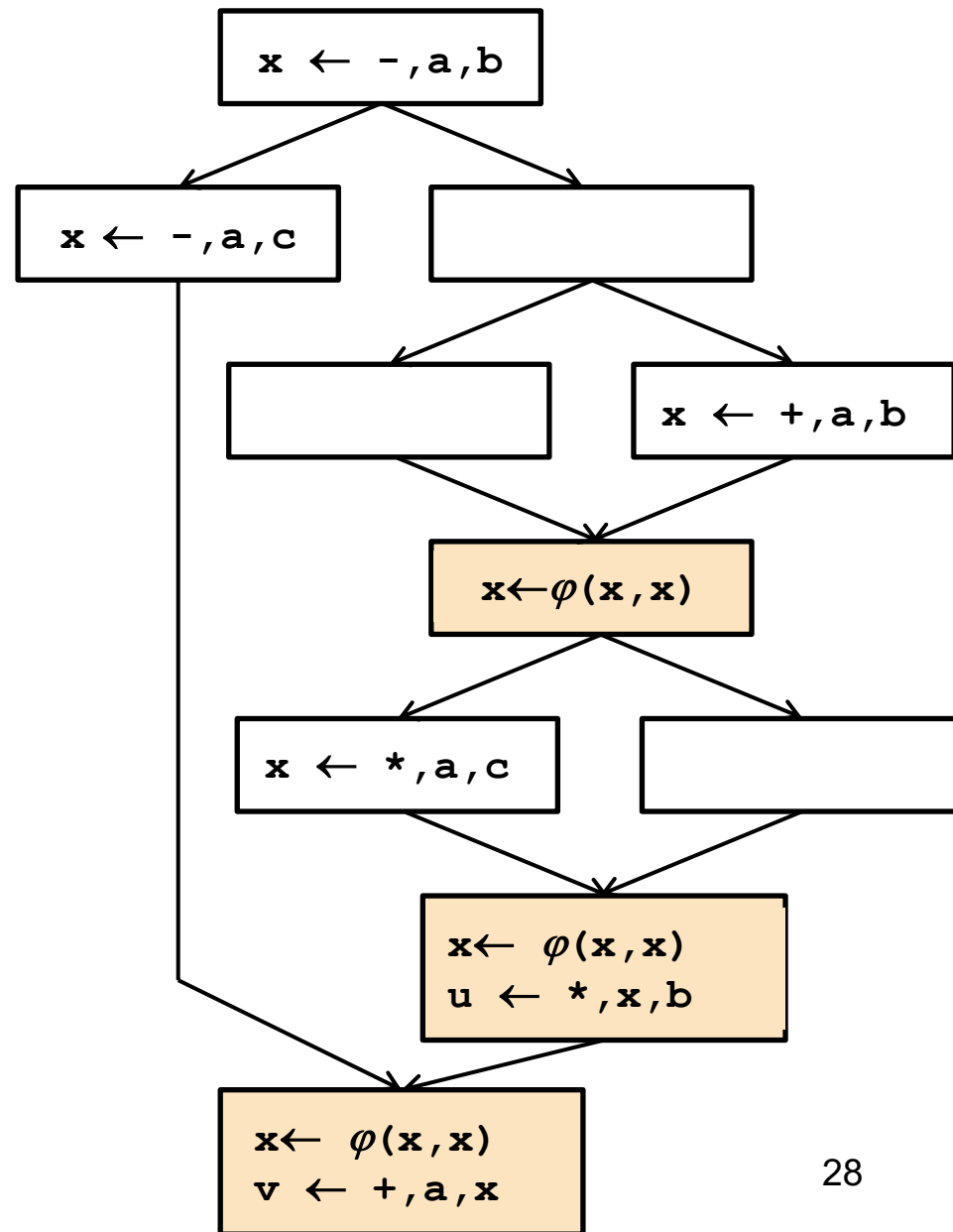
6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример



6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

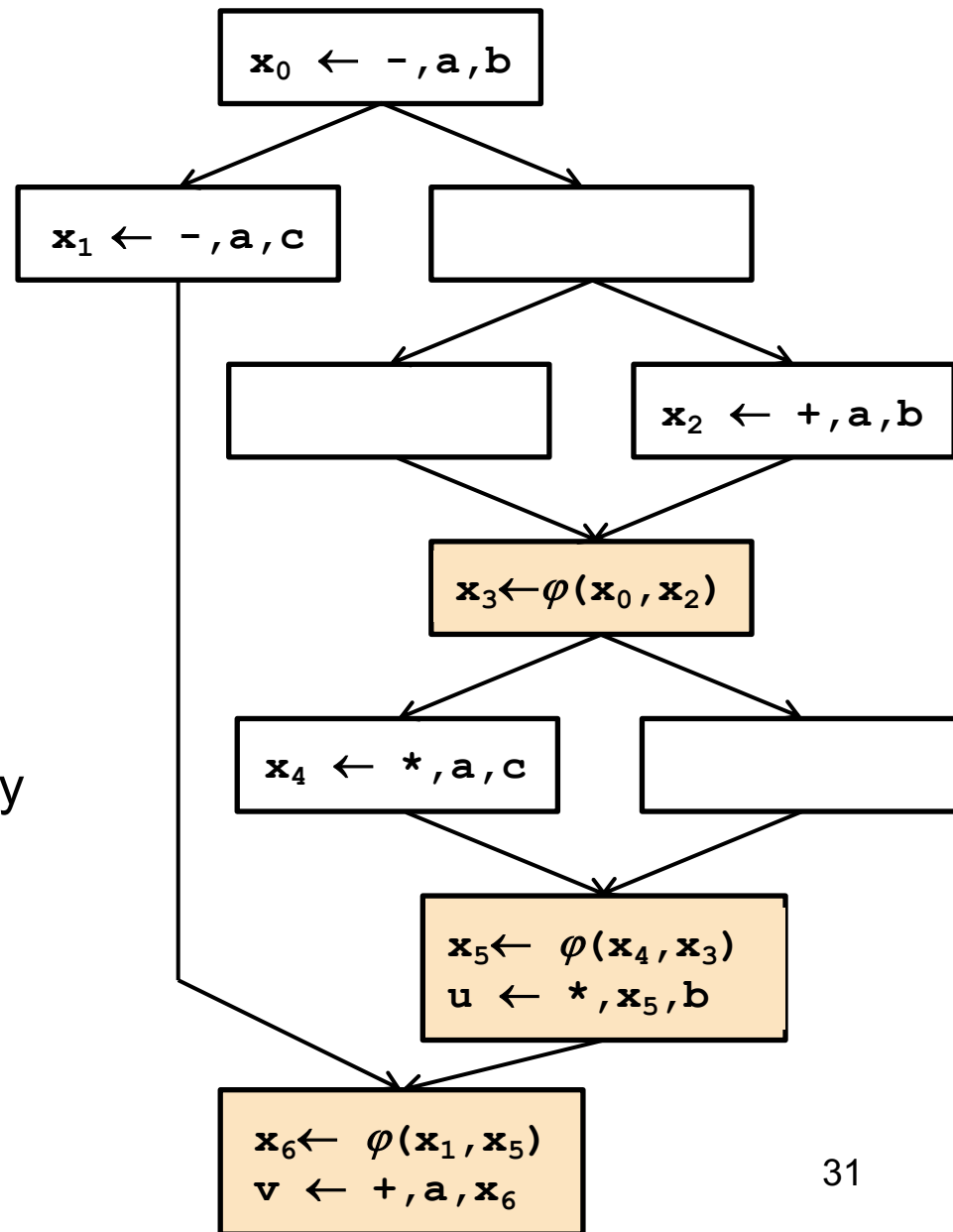
- ◇ Алгоритм вставил ϕ -функцию после каждой точки сбора ГПУ.
- ◇ Но это еще не SSA-форма, так как переменные еще не переименованы.



6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

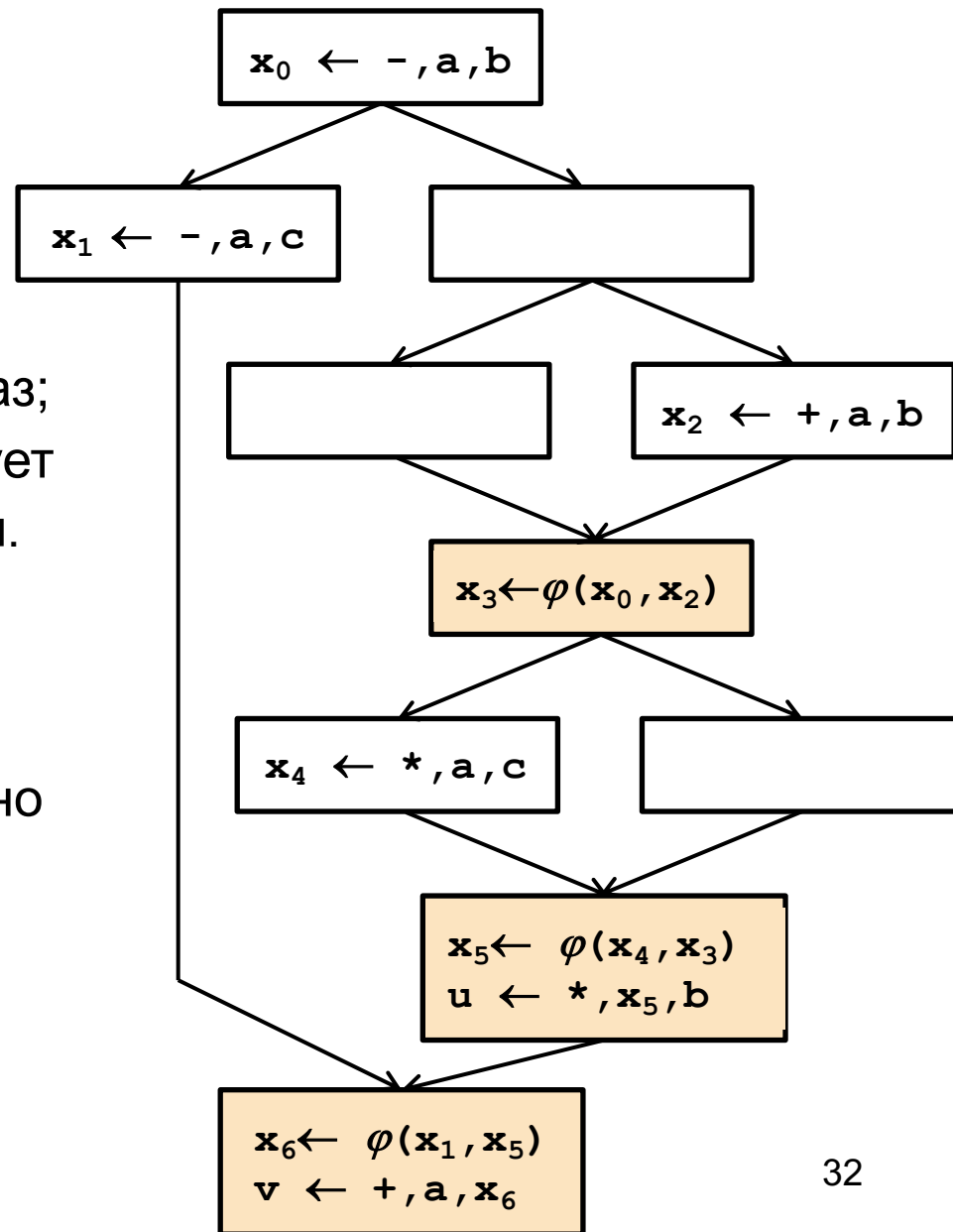
- ◇ Алгоритм вставил φ -функцию в каждой точке сбора ГПУ.
- ◇ После преобразования процедуры в SSA-форму
 - (1) внутри процедуры каждое определение создает уникальное имя;
 - (2) каждое использование обращается к единственному определению.



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 возможное количество φ -функций). Чтобы не всегда вставлять φ -функции необходимо для каждой точки сбора уметь выяснять, какие переменные нуждаются в φ -функциях, а какие нет.
- ◇ Частично усеченная SSA-форма — это «минимальная» форма 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

возможное количество. Чтобы не всегда вставлять φ -функции необходимо **для каждой точки сбора** уметь выяснять, какие

- ◇ Частично усеченная SSA-форма «минимально усеченная» (или «минимально усеченная») — это такая форма, в которой для каждой переменной, которая встречается в программе, для каждого определения переменной уметь находить множество всех точек сбора, которые нуждаются в φ -функциях для значения, порожденного этим определением.

«минимально усеченная»

Практически для каждого определения переменной уметь находить множество всех точек сбора, которые нуждаются в φ -функциях для значения, порожденного этим определением.

Наиболее

SSA-формы

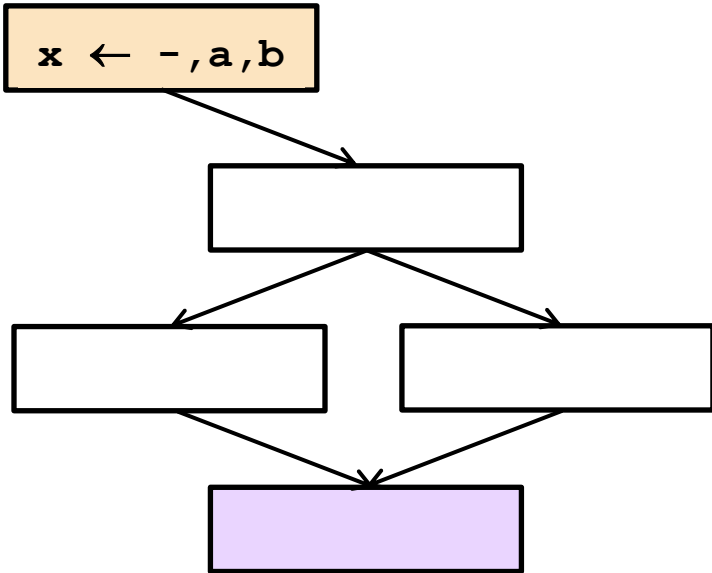
прошлого века.

й части

енной

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

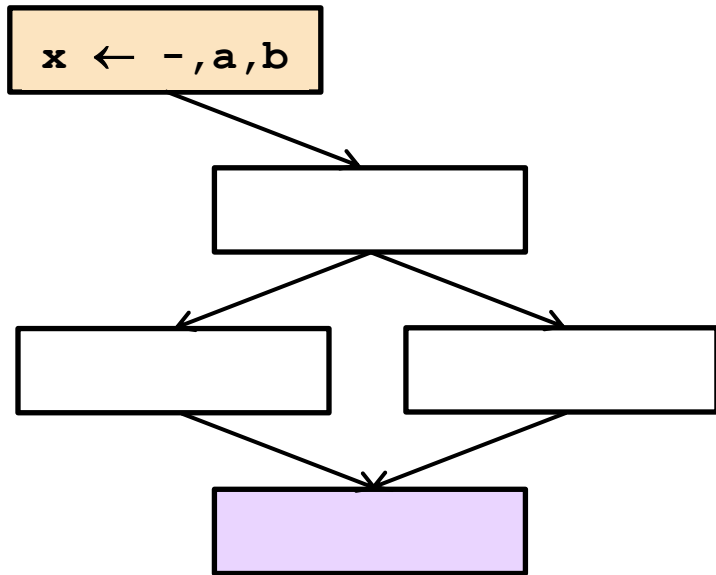
6.3.1. Постановка задачи



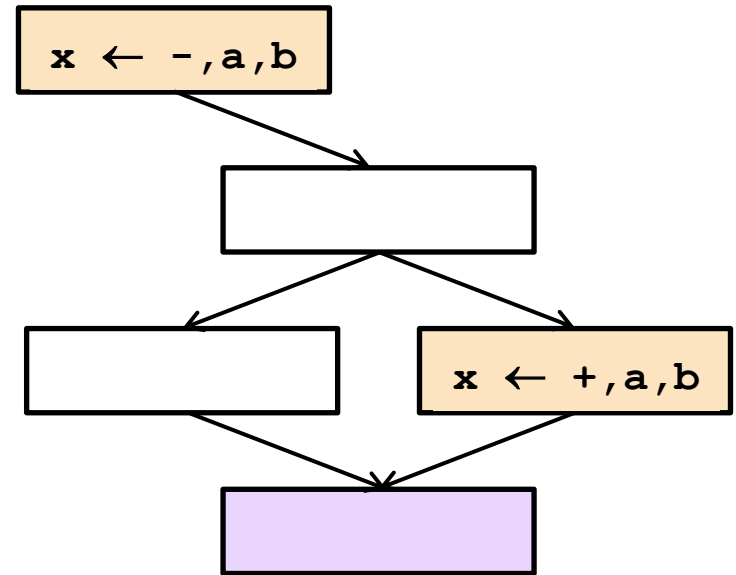
В лиловом блоке φ -функция для x **не нужна**, так как и слева, и справа приходит одно и то же значение x

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи



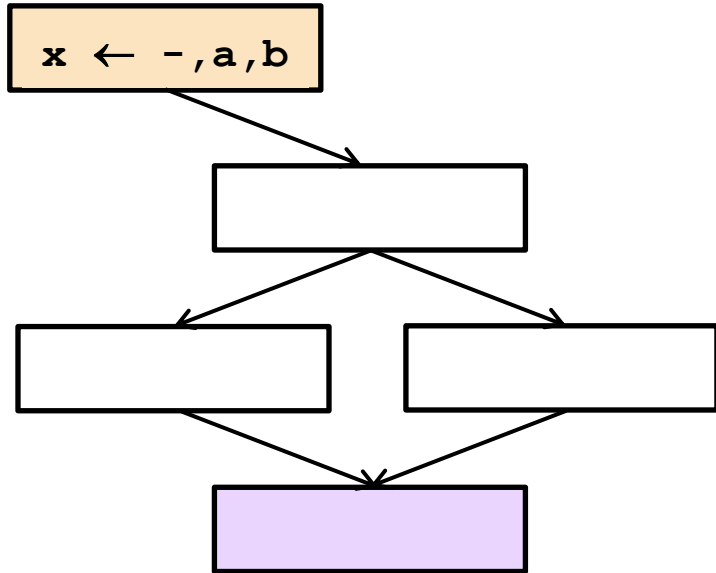
В лиловом блоке φ -функция для \mathbf{x} **не нужна**, так как и слева, и справа приходит одно и то же значение \mathbf{x}



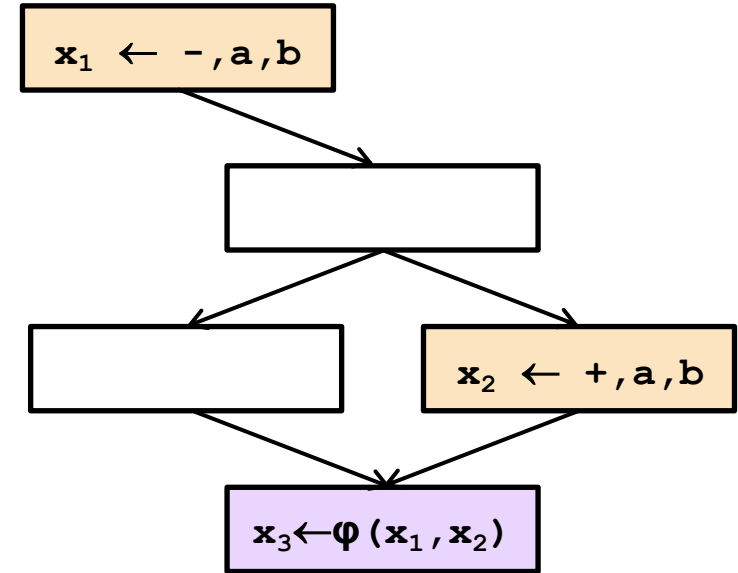
В лиловом блоке **нужна** φ -функция для \mathbf{x} , так как справа появился блок, в котором вычисляется еще одно значение \mathbf{x}

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

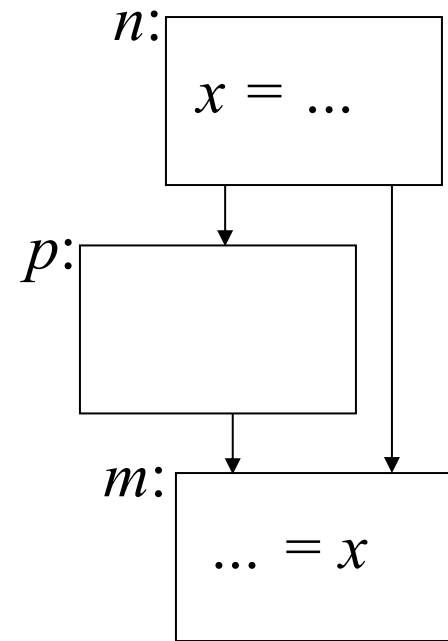


После переименования SSA-имена левого и правого аргументов φ -функции $\varphi(x, x)$ и ее результата должны быть такими, как показано на рисунке, так как значение x_1 поступает слева, а значение x_2 – справа.

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.1. Постановка задачи

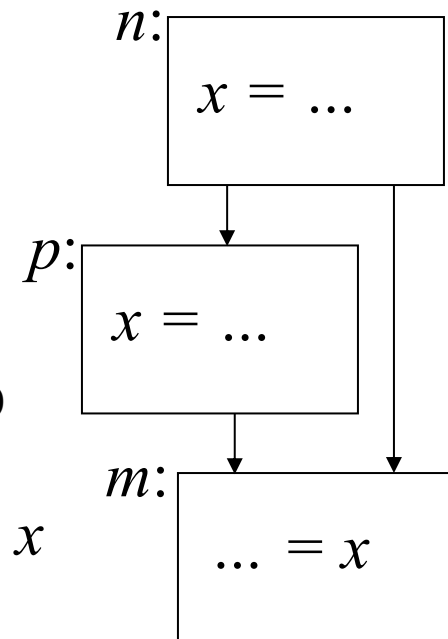
- ◇ Пусть $Dom(m)$ – множество доминаторов узла m .
- ◇ Если $n \in Dom(m)$, определение x_0 в вершине n не требует φ -функции в узле m , так как каждый путь, который достигает m , проходит через n .



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

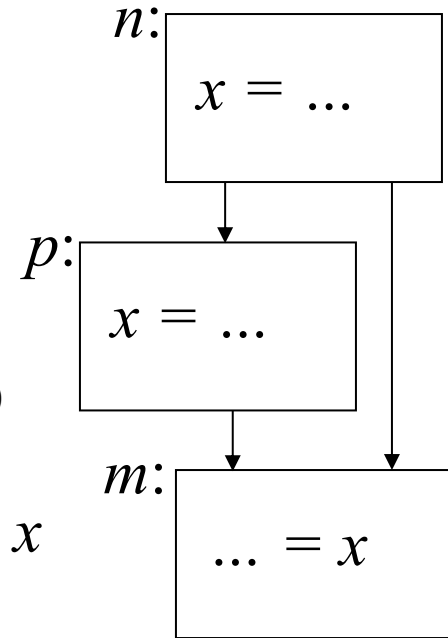
◇ Пусть $Dom(m)$ – множество доминаторов узла m .

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

Если путь, который контрольный поток 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 .

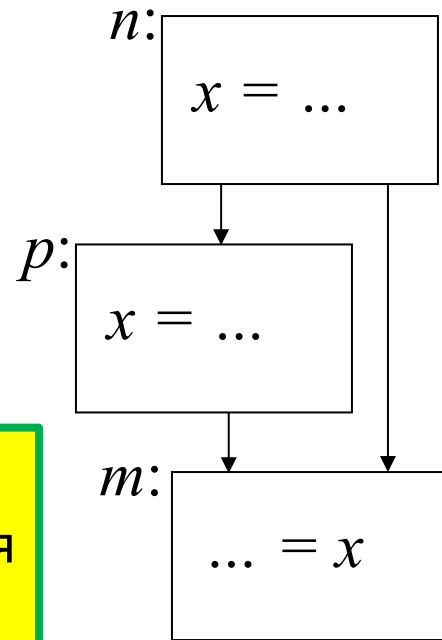
При этом φ -функцию будет требовать не определение x в узле n , а его переопределение в узле p .



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 .
В узле m , так как доминатором узла m является узел p , то любой путь, который достигает m , проходит через p .
- ◇ Если $n \in Dom(m)$, единственным вариантом, при котором определение x_0



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** 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

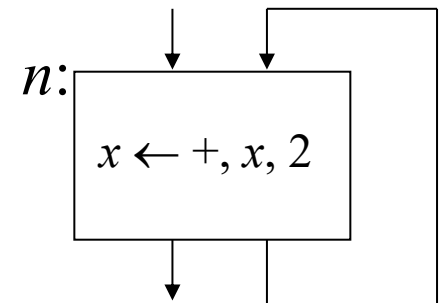
6.3.2. Размещение φ -функций

- ◇ Базовый алгоритм помещал по φ -функции для **каждой** 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

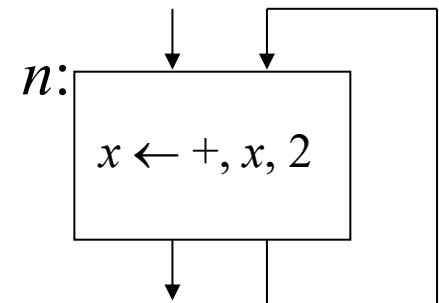
6.3.2. Размещение φ -функций

- ◇ Базовый алгоритм помещал по φ -функции для **каждой** 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.** $DF(n) = \{n\}$

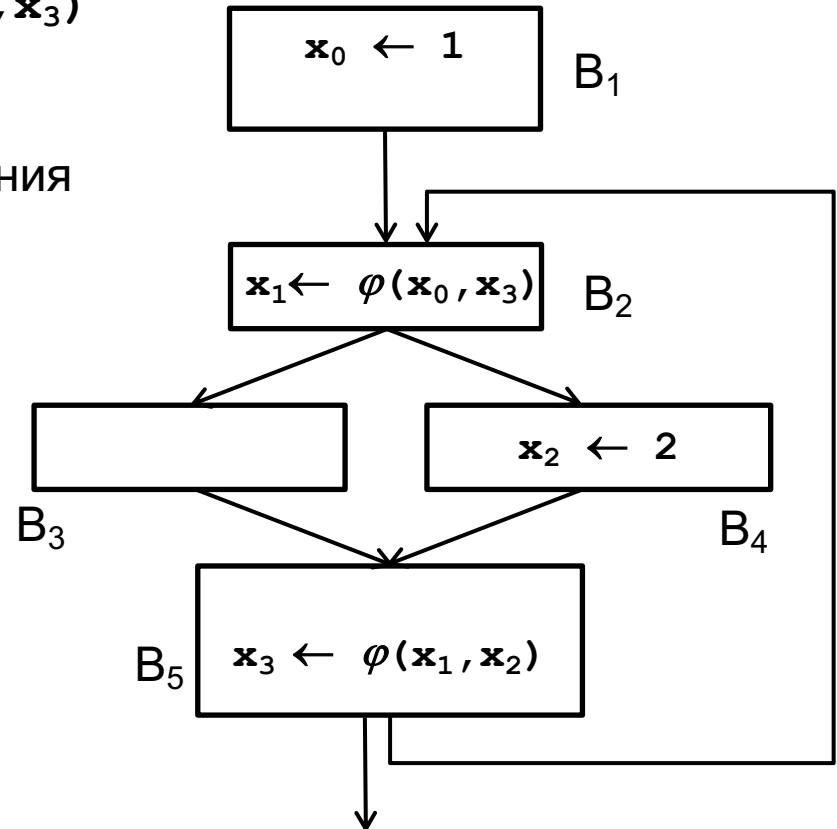


6.2 Построение SSA-формы

6.2.3. Базовый алгоритм построения SSA-формы. Пример

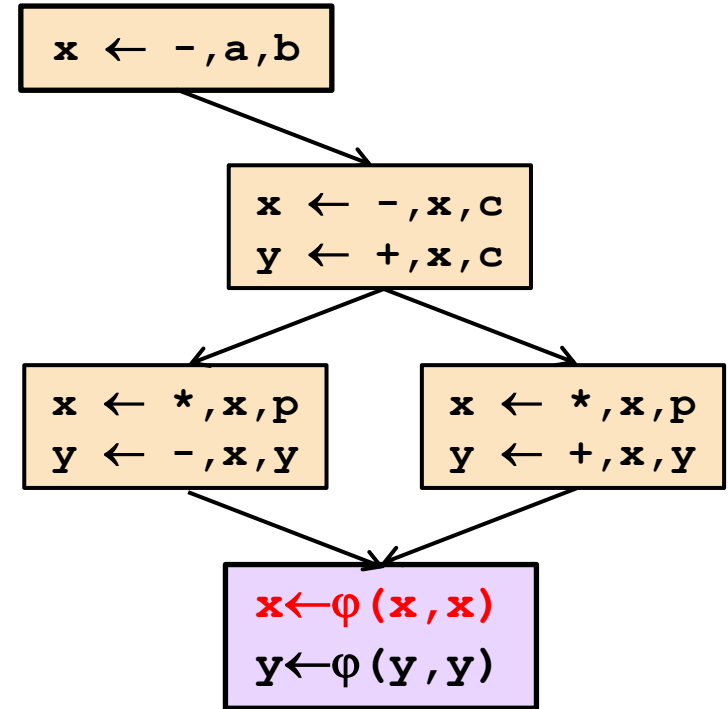
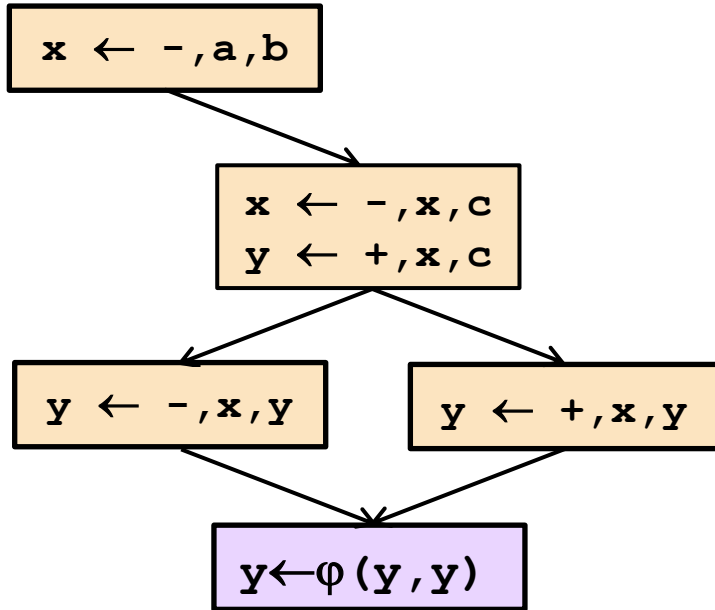
«При этом вставленная φ -функция становится новым определением x , так что могут потребоваться новые φ -функции.»

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

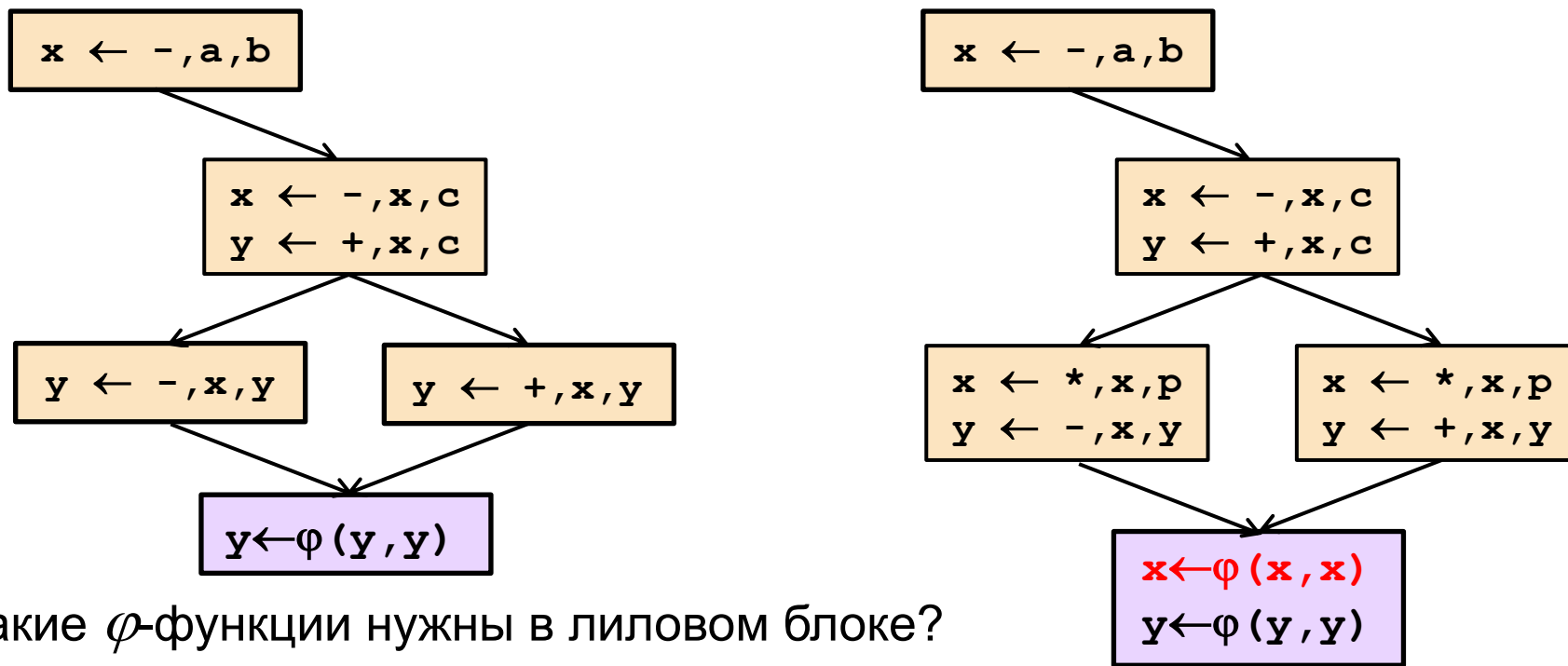
6.3.1. Постановка задачи. Пример



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*

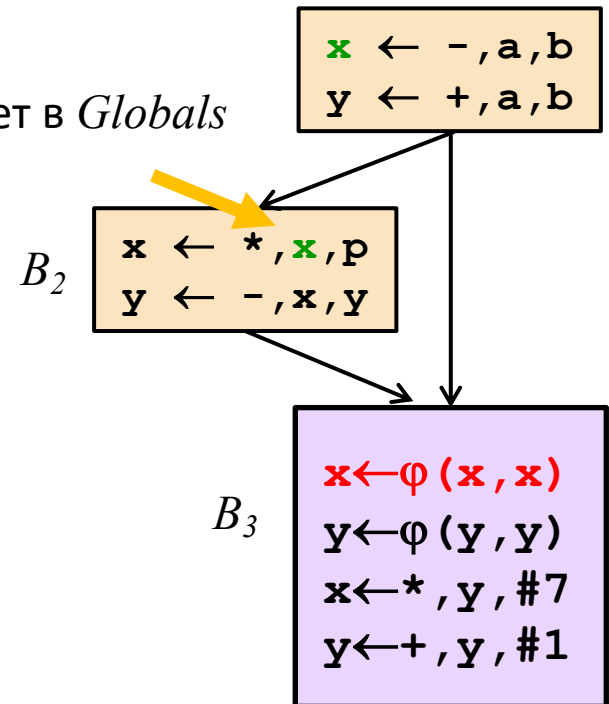
Переменная, которая используется только в одном блоке, не может иметь *живой* ϕ -функции.

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. имен, используемых в нескольких базовых блоках.

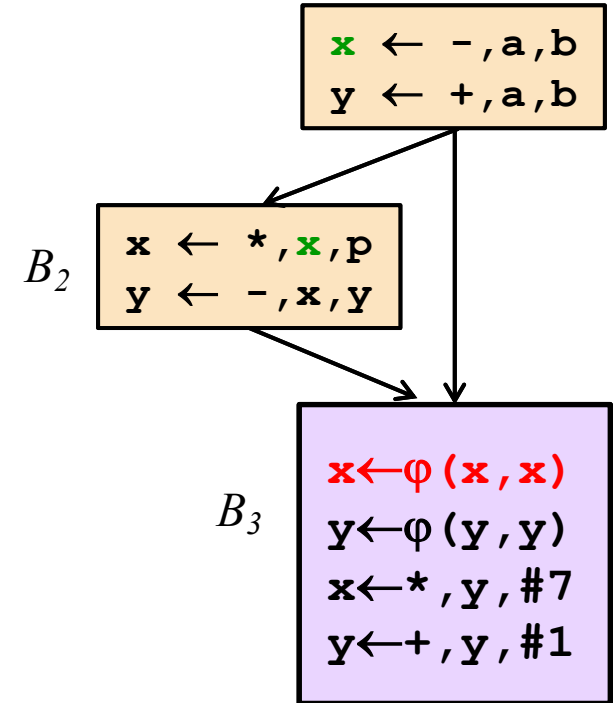
Но это не гарантирует, что все аргументы ϕ -функций живы, и может приводить к появлению избыточных ϕ -функций (например, в B_3)



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 при анализе живых переменных $x \in def_B$, а $y \in use_B$ (x мертвая, а y живая)



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ -функций

- ◇ Переменная, которая используется только в одном блоке, 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. (Этого, однако, не достаточно, чтобы предотвратить ситуацию с предыдущего слайда).
- ◇ 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 (вместо построения def_B).
- ◇ 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 = \emptyset ;

for each variable *x* **do** *Blocks(x)* = \emptyset ;

for each block *B* **do** {

def_B = \emptyset ;

for each instruction *i* ∈ *B* **do** {

 // пусть команда *i* имеет вид: $x \leftarrow op, y, z$

if $y \notin def_B$ **then** *Globals* = *Globals* ∪ {*y*};

if $z \notin def_B$ **then** *Globals* = *Globals* ∪ {*z*};

def_B = *def_B* ∪ {*x*};

Blocks(x) = *Blocks(x)* ∪ {*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  $x \in \text{Globals}$  do {  
    WorkList = Blocks( $x$ );  
    for each block  $B \in \text{WorkList}$  do  
        for each block  $D \in \text{DF}(B)$  do {  
            if ( $D$  не содержит  $\varphi$ -функции для  $x$ ) {  
                Вставить  $\varphi$ -функцию для  $x$  в  $D$ ;  
                WorkList = WorkList  $\cup$  { $D$ };  
            }  
        }  
    }  
    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  $x \in \text{Globals}$  do {  
    WorkList = Blocks( $x$ );  
    for each block  $B \in \text{WorkList}$  do  
        for each block  $D \in \text{DF}(B)$  do {  
            if ( $D$  не содержит  $\varphi$ -функции для  $x$ ) {  
                Вставить  $\varphi$ -функцию для  $x$  в  $D$ ;  
                WorkList = WorkList  $\cup$  { $D$ };  
            }  
        }  
    }  
    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 вставления φ -функции для x в блок D алгоритм добавляет D в *WorkList*, чтобы в дальнейшем учесть новое определение x в блоке D .

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.2. Размещение φ -функций

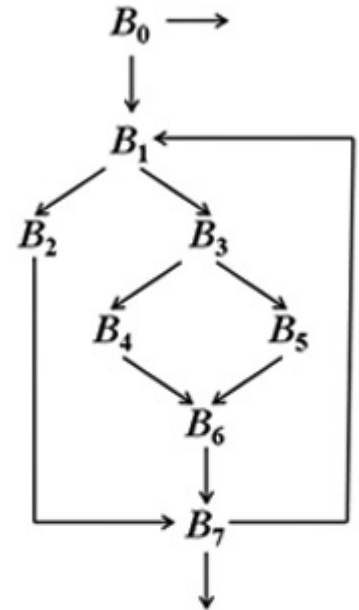
- ◇ **Замечание 2.** Для улучшения эффективности алгоритма необходимо избегать следующих двух видов дублирования:
- (1) помещение какого-либо блока в *WorkList* более одного раза для каждого глобального имени; для этого можно вести список уже обработанных блоков (например, не удалять B из *WorkList*, а помечать его как уже обработанный).
 - (2) рассматриваемый блок может входить в состав границ доминирования нескольких блоков, входящих в *WorkList*; чтобы избежать вставления дублирующих φ -функций для переменной x , можно использовать список 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

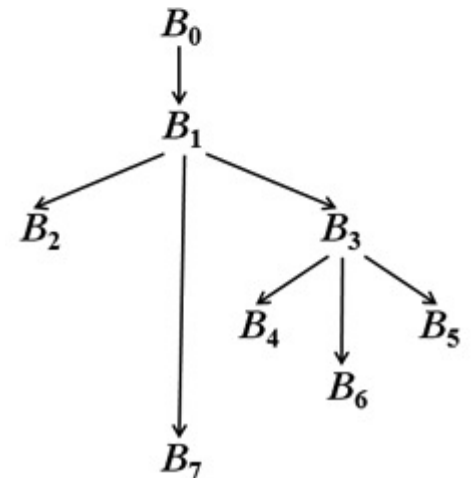
6.3.3. Размещение ϕ -функций. Пример.

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

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
$DF(B_n)$	\emptyset	$\{B_1\}$	$\{B_7\}$	$\{B_7\}$	$\{B_6\}$	$\{B_6\}$	$\{B_7\}$	$\{B_1\}$

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 $WorkList$.

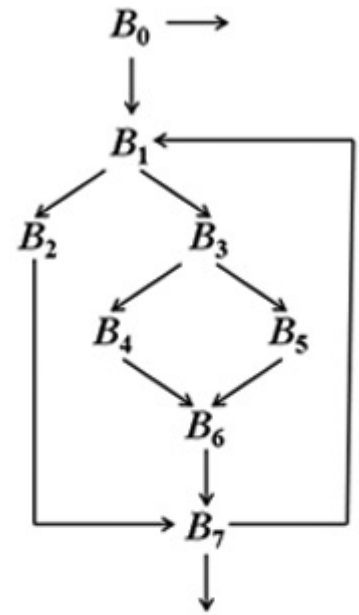
x	a	b	c	d	i
Insert $\varphi(x)$	$\{B_7, B_1\}$	$\{B_7, B_1\}$	$\{B_7, B_1, B_6\}$	$\{B_7, B_1, B_6\}$	$\{B_1\}$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

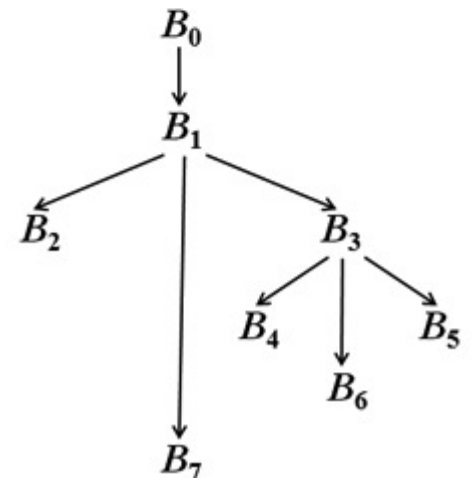
6.3.3. Размещение ϕ -функций. Пример.

B_0	$i \leftarrow 1$		
B_1	$a \leftarrow \phi(a, a)$ $b \leftarrow \phi(b, b)$ $c \leftarrow \phi(c, c)$ $d \leftarrow \phi(d, d)$ $i \leftarrow \phi(i, i)$ $a \leftarrow$ $b \leftarrow$	B_7	$a \leftarrow \phi(a, a)$ $b \leftarrow \phi(b, b)$ $c \leftarrow \phi(c, c)$ $d \leftarrow \phi(d, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B_2	$b \leftarrow$ $c \leftarrow$ $d \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \phi(c, c)$ $d \leftarrow \phi(d, d)$ $b \leftarrow$
B_5	$c \leftarrow$		

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  $i \in \text{Globals}$  do {  
    counter[i] = 0;  
    stack[i] =  $\emptyset$ ;  
};  
Rename ( $n_0$ ) ;
```

◇ Функция **NewName**:

```
NewName(n) { // n - имя переменной  
    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  $\varphi$ -function  $\in B$ :  $x = \varphi(\dots)$  do
    rename  $x$  as NewName( $x$ ) ;
for each instruction  $\in B$ :  $x \leftarrow op, y, z$  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  $\varphi$ -function parameters ;
for each successor  $S$  of  $B$  in the
    dominator tree do Rename( $S$ )
for each instruction  $\in B$ :  $x \leftarrow op, y, z$  do
    Pop(stack[ $x$ ]) ;
for each  $\varphi$ -function  $\in B$ :  $x = \varphi(\dots)$  do
    Pop(stack[ $x$ ]) ;
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.7. Переименование переменных.

Функция *Rename*(*B*) :

```
for each  $\varphi$ -function  $\in B$ :  $x = \varphi(\dots)$  do
    rename  $x$  as  newName( $x$ ) ;
for each instruction  $\in B$ :  $x \leftarrow op, y, z$  do{
    rewrite  $y$  as top(stack[ $x$ ]);
    rewrite  $z$  as top(stack[ $x$ ]);
    rewrite  $x$  as  newName( $x$ ) ;
}
for each successor of  $B$  in the flowgraph do
    fill in  $\varphi$ -function parameters;
for each successor  $S$  of  $B$  in the
    dominator tree do Rename( $S$ )
for each instruction  $\in B$ :  $x \leftarrow op, y, z$  do
    Pop(stack[ $x$ ]) ;
for each  $\varphi$ -function  $\in B$ :  $x = \varphi(\dots)$  do
    Pop(stack[ $x$ ]) ;
```

```
NewName( $n$ ) {
     $i = \text{counter}[n]$ ;
     $\text{counter}[n] += 1$ ;
    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  $\varphi$ -function  $\in B$ :  $x = \varphi(\dots)$  do
    rename  $x$  as  $newName(x)$ ;
for each instruction  $\in B$ :  $x \leftarrow op, y, z$  do{
    rewrite  $y$  as  $top(stack[x])$ ;
    rewrite  $z$  as  $top(stack[x])$ ;
    rewrite  $x$  as  $newName(x)$ ;
}
for each successor of  $B$  in the flowgraph do
    fill in  $\varphi$ -function parameters;
for each successor  $S$  of  $B$  in the
    dominator tree do  $Rename(S)$ 
for each instruction  $\in B$ :  $x \leftarrow op, y, z$  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!!!

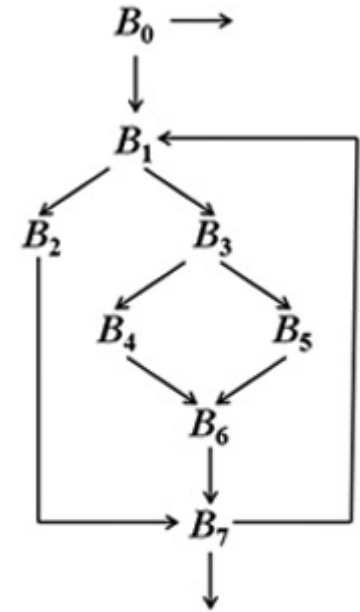
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

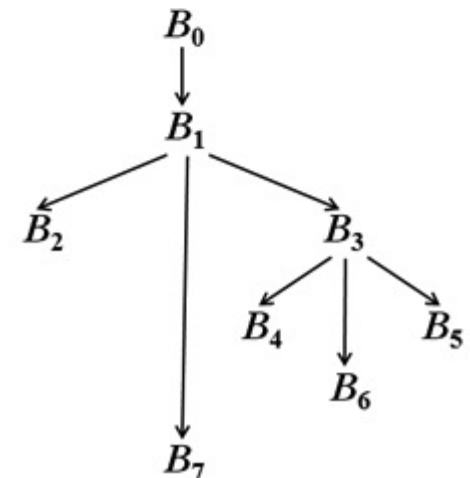
Применим алгоритм переименования к рассматриваемому примеру в предположении, что на входе в блок B_0 определены имена a_0, b_0, c_0, d_0 .

B_0	$i \leftarrow 1$		
B_1	$a \leftarrow \phi(a, a)$ $b \leftarrow \phi(b, b)$ $c \leftarrow \phi(c, c)$ $d \leftarrow \phi(d, d)$ $i \leftarrow \phi(i, i)$ $a \leftarrow$ $b \leftarrow$	B_7	$a \leftarrow \phi(a, a)$ $b \leftarrow \phi(b, b)$ $c \leftarrow \phi(c, c)$ $d \leftarrow \phi(d, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B_2	$b \leftarrow$ $c \leftarrow$ $d \leftarrow$	B_3	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B_4	$d \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \phi(c, c)$ $d \leftarrow \phi(d, d)$ $b \leftarrow$
B_5	$c \leftarrow$		

Граф потока управления



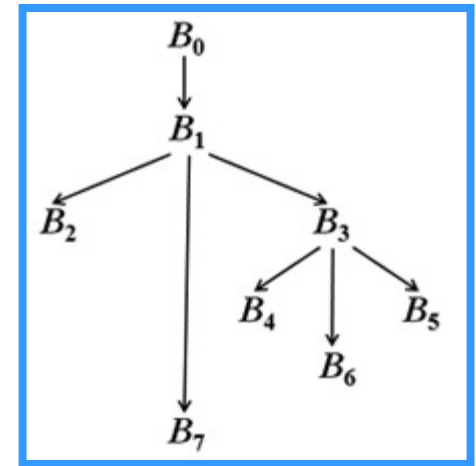
Дерево доминаторов



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



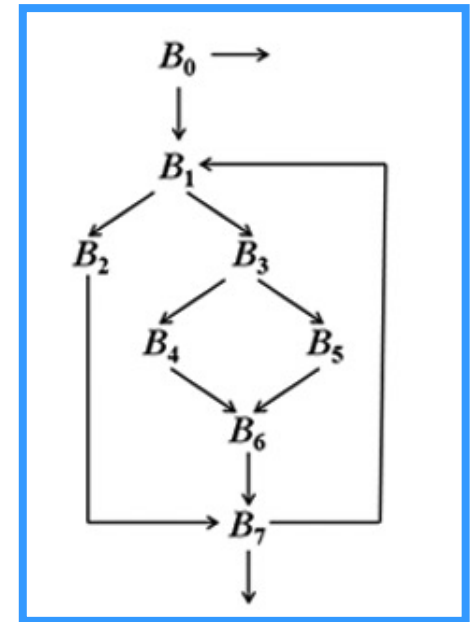
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

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 $Rename(B_0)$.

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

$B_0: \quad i \leftarrow 1;$



- ◇ $Rename(B_0)$:

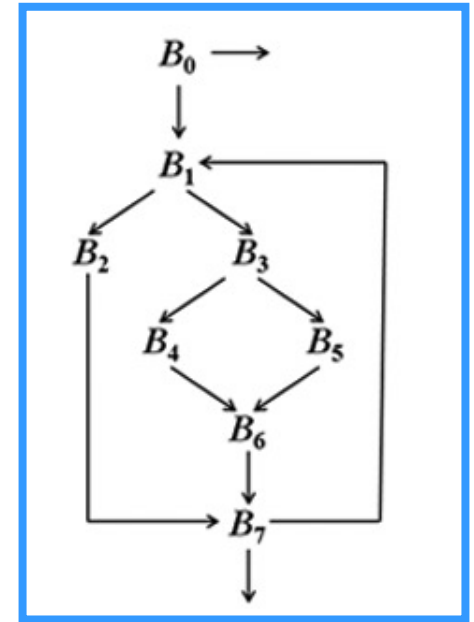
- ◇ Вызов $NewName(i) \rightarrow$ возвращает имя i_0
 - Замена $i \leftarrow 1;$ на $i_0 \leftarrow 1;$
 - Занесение i_0 в стек для i
 - Увеличение счетчика для i на 1
- ◇ Заполнение параметров φ -функций в B_1
- ◇ Вызов $Rename(B_1)$

$B_0: \quad i_0 \leftarrow 1;$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a \leftarrow \varphi(a_0, a)$ $b \leftarrow \varphi(b_0, b)$ $c \leftarrow \varphi(c_0, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_0, d)$ $i \leftarrow \varphi(i_0, i)$ $a \leftarrow$ $b \leftarrow$	B₇	$a \leftarrow \varphi(a, a)$ $b \leftarrow \varphi(b, b)$ $c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B₂	$b \leftarrow$ $c \leftarrow$ $d \leftarrow$	B₃	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B₄	$d \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$



	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	1	1	1	1	1
	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	

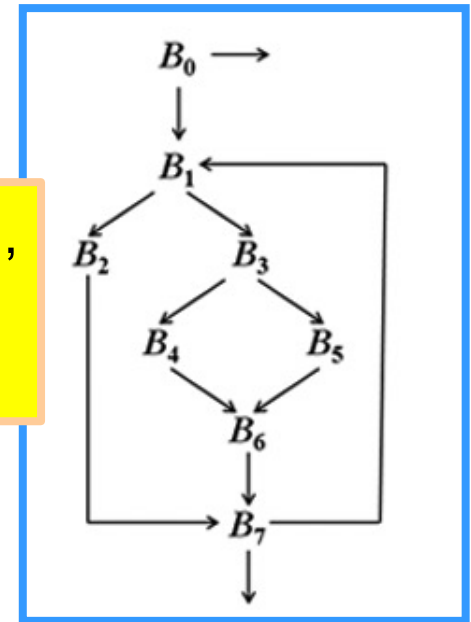
$B_0: \quad i \leftarrow 1;$

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

занесение \perp_0 в стек для i

Увеличение счетчика для i на 1

- ◇ Заполнение параметров φ -функций в B_1
- ◇ Вызов $Rename(B_1)$



$B_0: \quad i_0 \leftarrow 1;$

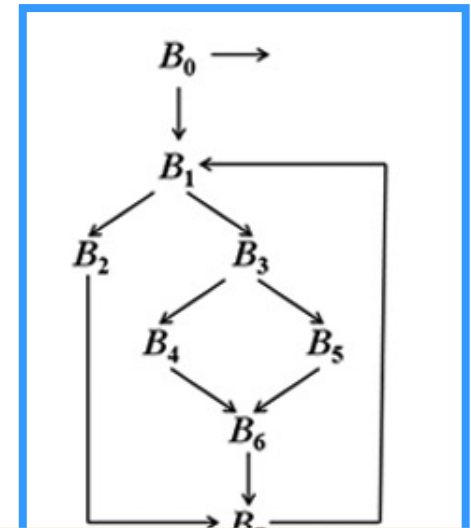
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	

$B_0: \quad i \leftarrow 1;$



- ◇ $Rename(B_0)$:

- ◇ Вызов $NewName(i) \rightarrow$ возвращает имя i_0
 - Замена $i \leftarrow 1;$ на $i_0 \leftarrow 1;$
 - 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

$B_0: \quad i_0 \leftarrow 1;$

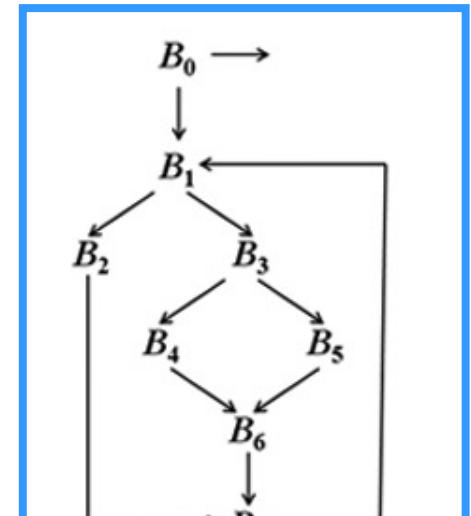
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	

$B_0: \quad i \leftarrow 1;$



- ◇ $Rename(B_0)$:

- ◇ Вызов $NewName(i) \rightarrow$ возвращает имя i_0
 - Замена $i \leftarrow 1;$ на $i_0 \leftarrow 1;$
 - Занесение i_0 в стек для i
 - Увеличение счетчика для i на 1

- ◇ Заполнение параметров φ -функций в B_1 $B_1 = Succ(B_0)$ по ГПУ

- ◇ Вызов $Rename(B_1)$ $B_1 = Succ(B_0)$ по дереву доминаторов

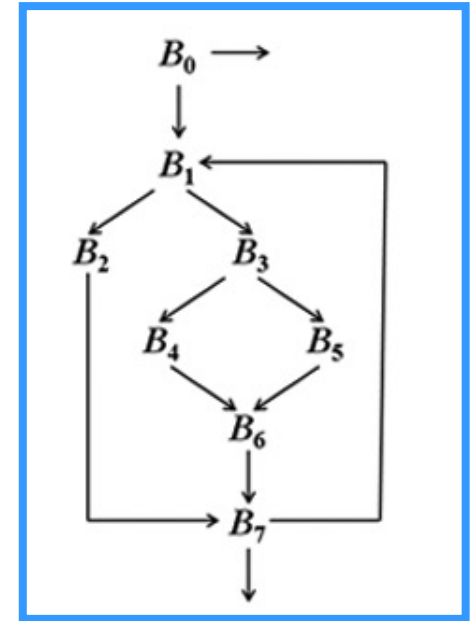
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

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 $Rename(B_0)$.

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

$B_0: \quad i \leftarrow 1;$



- ◇ $Rename(B_0)$:

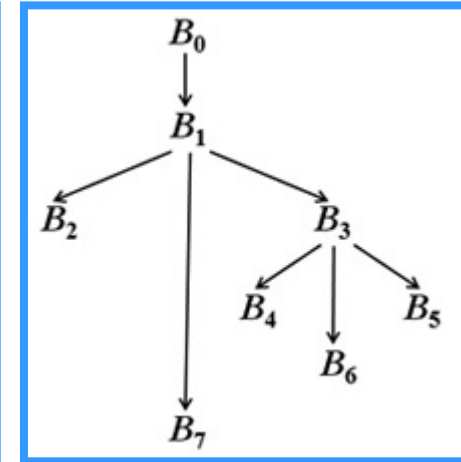
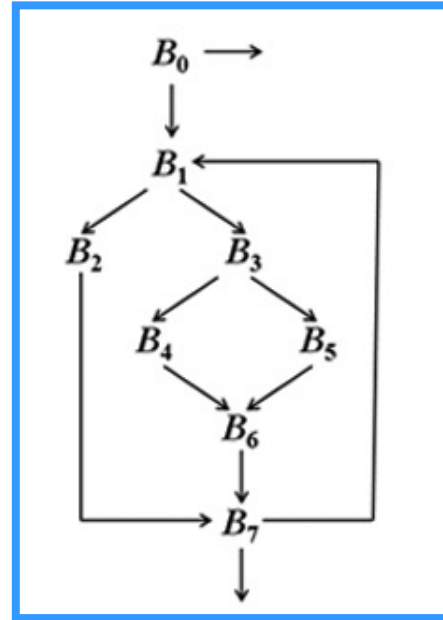
- ◇ Вызов $NewName(i) \rightarrow$ возвращает имя i_0
 - Замена $i \leftarrow 1;$ на $i_0 \leftarrow 1;$
 - Занесение i_0 в стек для i
 - Увеличение счетчика для i на 1
- ◇ Заполнение параметров φ -функций в B_1
- ◇ Вызов $Rename(B_1)$

$B_0: \quad i_0 \leftarrow 1;$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₁	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	1	1	1	1	1
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀



Rename(B₁):

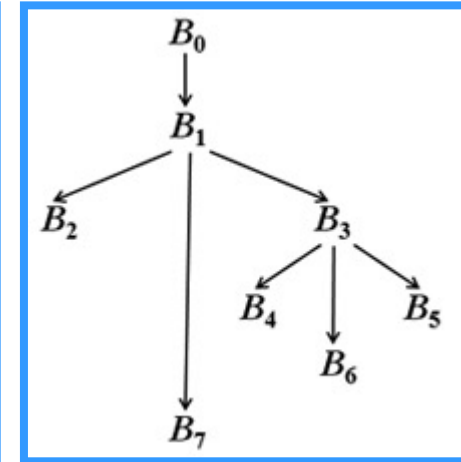
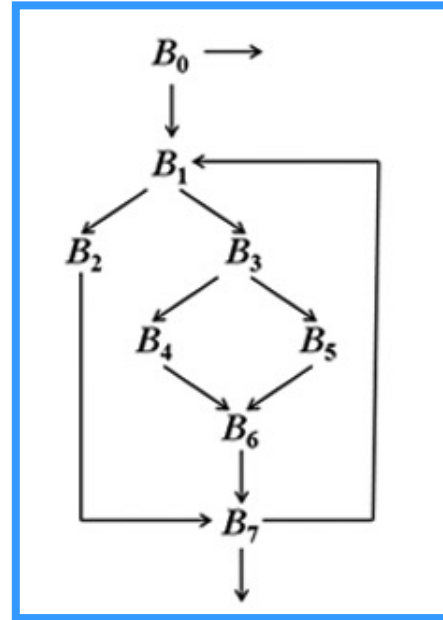
1. Переименование φ-функций

B ₁	<i>a</i>	←	φ(<i>a</i> ₀ , <i>a</i>)
	<i>b</i>	←	φ(<i>b</i> ₀ , <i>b</i>)
	<i>c</i>	←	φ(<i>c</i> ₀ , <i>c</i>)
	<i>d</i>	←	φ(<i>d</i> ₀ , <i>d</i>)
	<i>i</i>	←	φ(<i>i</i> ₀ , <i>i</i>)
	<i>a</i>	←	
	<i>b</i>	←	

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_1	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	1	1	1	1	1
Стеки (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0



Rename(B_1):

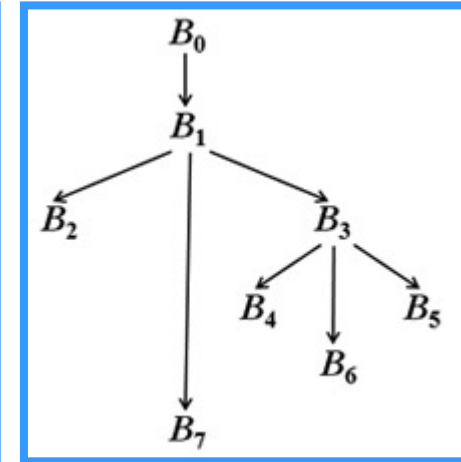
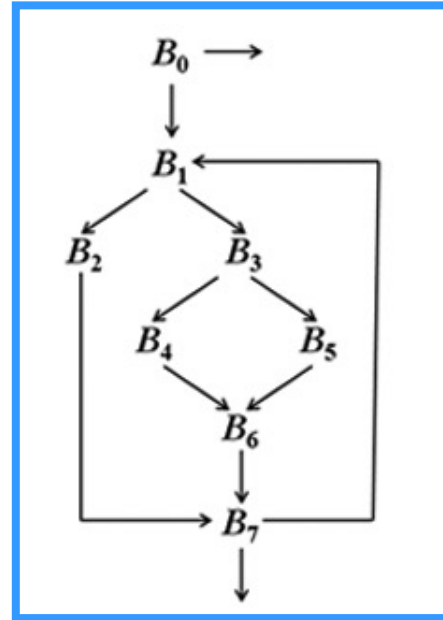
1. Переименование φ -функций

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1				



Rename(B_1):

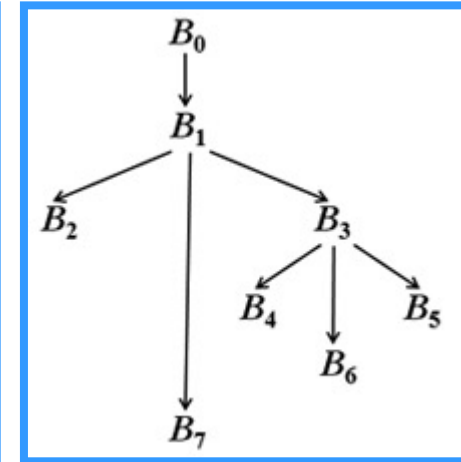
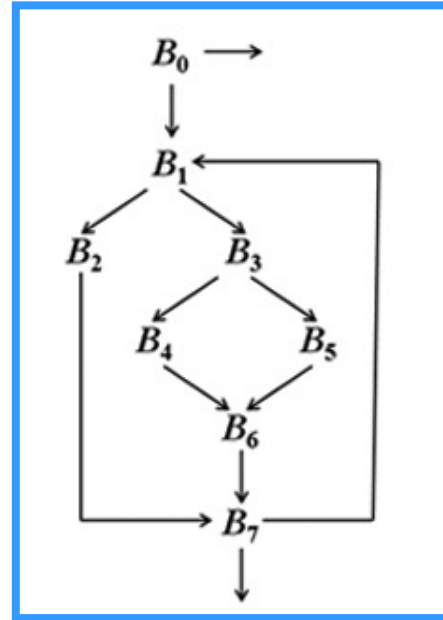
1. Переименование φ -функций

B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0 , a)$
	$b \leftarrow \varphi(b_0 , b)$
	$c \leftarrow \varphi(c_0 , c)$
	$d \leftarrow \varphi(d_0 , d)$
	$i \leftarrow \varphi(i_0 , i)$
	$a \leftarrow$
	$b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

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



Rename(B_1):

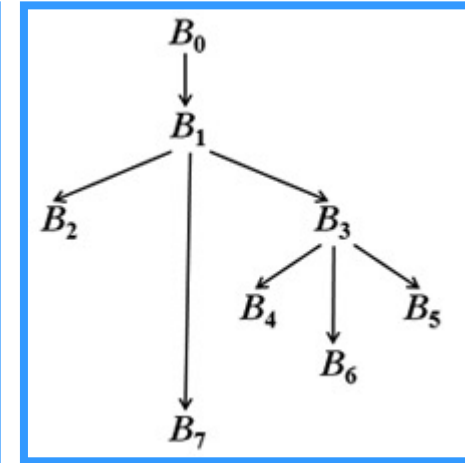
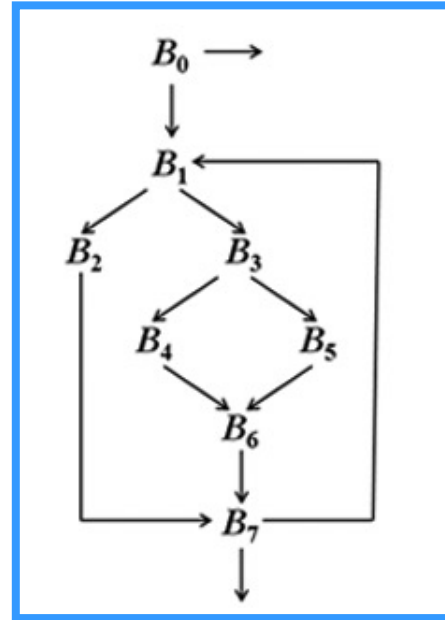
1. Переименование φ -функций

B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0 , a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0 , b)$
	$c \leftarrow \varphi(c_0 , c)$
	$d \leftarrow \varphi(d_0 , d)$
	$i \leftarrow \varphi(i_0 , i)$
	$a \leftarrow$
	$b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

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



Rename(B_1):

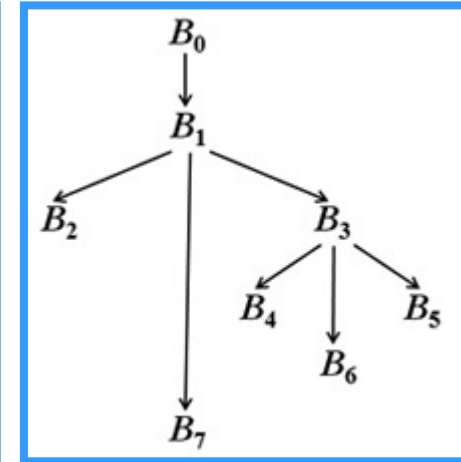
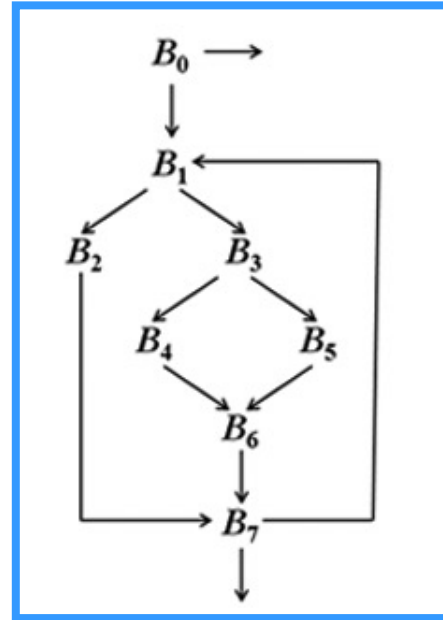
1. Переименование φ -функций

B_1	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0 , a)$
	$b_1 \leftarrow \varphi(b_0 , b)$
	$c_1 \leftarrow \varphi(c_0 , c)$
	$d \leftarrow \varphi(d_0 , d)$
	$i \leftarrow \varphi(i_0 , i)$
	$a \leftarrow$
	$b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₁	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	2	2	2	2	1
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	



Rename(B₁):

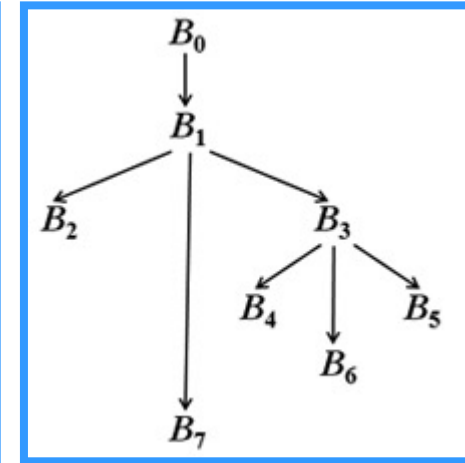
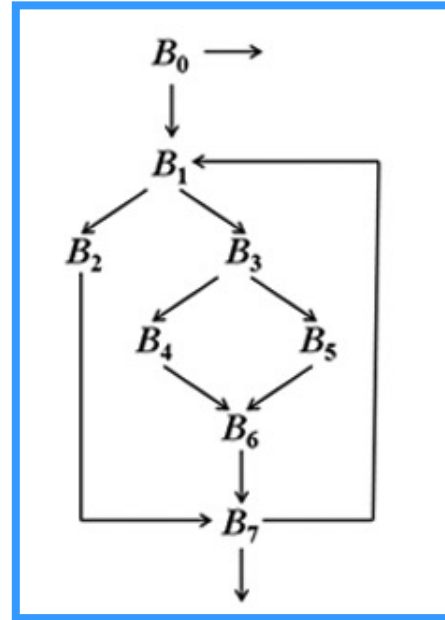
1. Переименование φ-функций

B ₁	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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1



Rename(B_1):

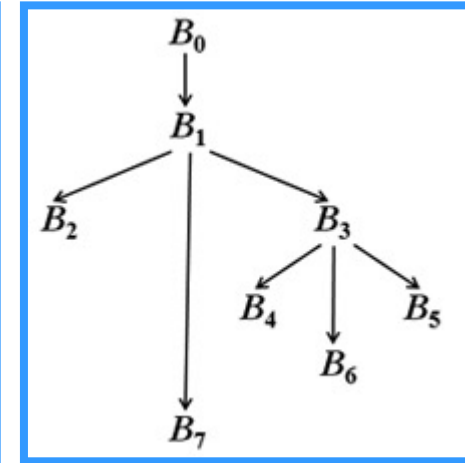
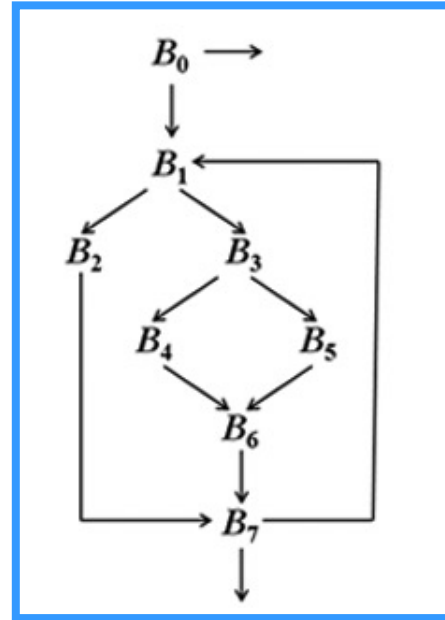
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций

B_1	$a_1 \leftarrow \phi(a_0 , a)$
	$b_1 \leftarrow \phi(b_0 , b)$
	$c_1 \leftarrow \phi(c_0 , c)$
	$d_1 \leftarrow \phi(d_0 , d)$
	$i_1 \leftarrow \phi(i_0 , i)$
	$a \leftarrow$
	$b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₁	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	2	2	2	2	2
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	i₁



Rename(B₁):

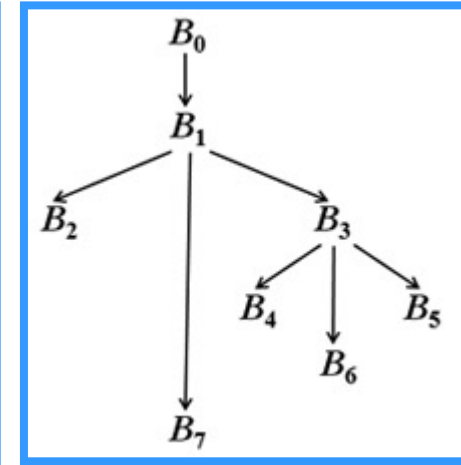
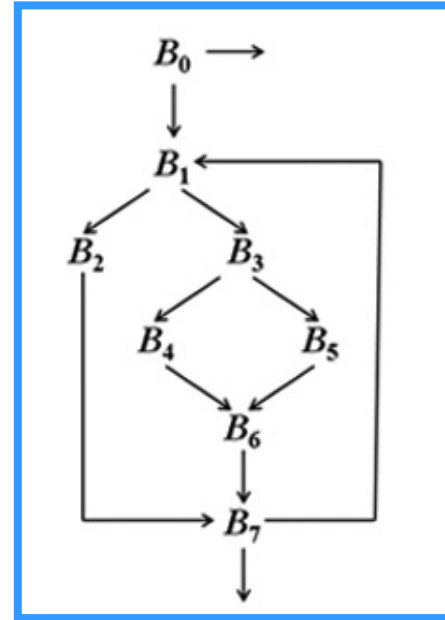
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B ₁	a ₁	←	ϕ	(	a ₀	,	a)
	b ₁	←	ϕ	(	b ₀	,	b)
	c ₁	←	ϕ	(	c ₀	,	c)
	d ₁	←	ϕ	(	d ₀	,	d)
	i ₁	←	ϕ	(	i ₀	,	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 (\downarrow)	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):

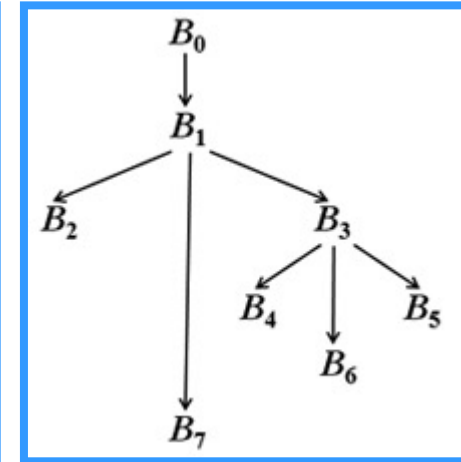
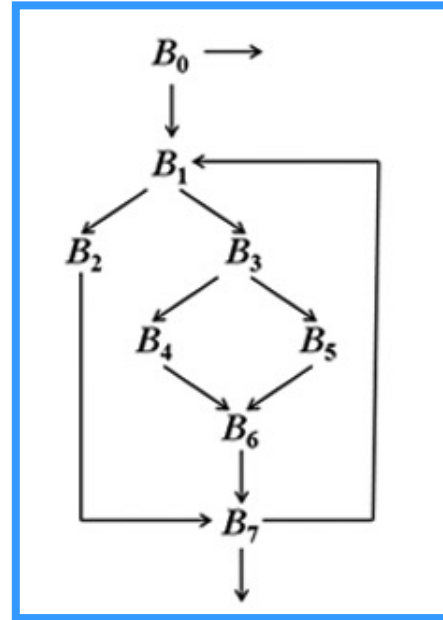
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_1 $a_1 \leftarrow \phi(a_0 , a)$
 $b_1 \leftarrow \phi(b_0 , b)$
 $c_1 \leftarrow \phi(c_0 , c)$
 $d_1 \leftarrow \phi(d_0 , d)$
 $i_1 \leftarrow \phi(i_0 , i)$
 $a_2 \leftarrow$
 $b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₁	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	i₁
	a₂	b₂			



Rename(B₁):

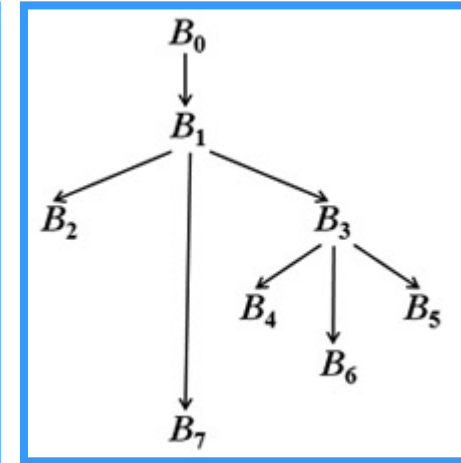
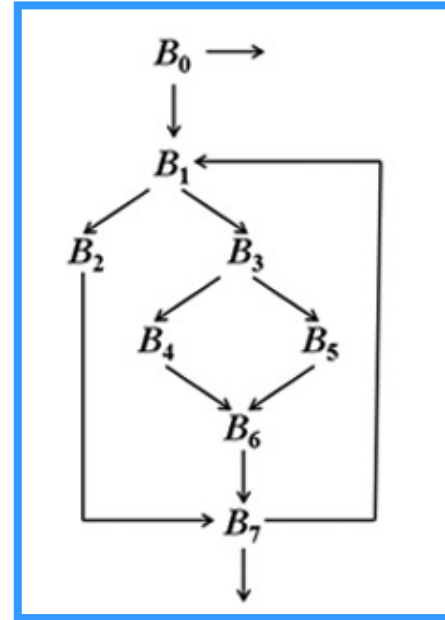
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров φ-функций в потомках в CFG (в потомках B₁ нет φ-функций)

B ₁	a ₁ ← φ(a ₀ , a)
	b ₁ ← φ(b ₀ , b)
	c ₁ ← φ(c ₀ , c)
	d ₁ ← φ(d ₀ , d)
	i ₁ ← φ(i ₀ , i)
	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	3	2	2	2
Стеки (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			



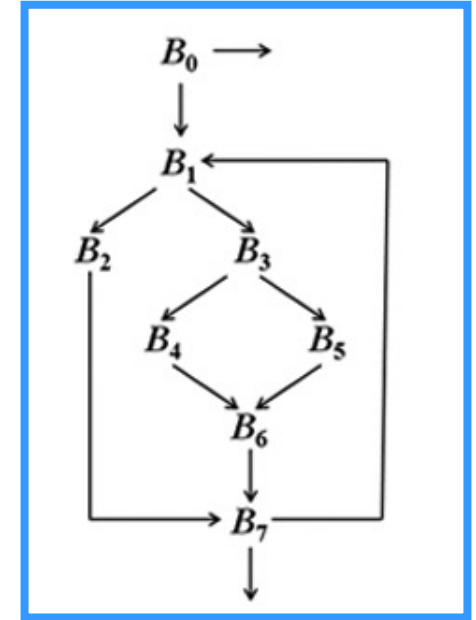
Rename(B_1):

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)**

B_1 $a_1 \leftarrow \phi(a_0 , a)$
 B_1 $b_1 \leftarrow \phi(b_0 , b)$
 B_1 $c_1 \leftarrow \phi(c_0 , c)$
 B_1 $d_1 \leftarrow \phi(d_0 , d)$
 B_1 $i_1 \leftarrow \phi(i_0 , i)$
 B_1 $a_2 \leftarrow$
 B_1 $b_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



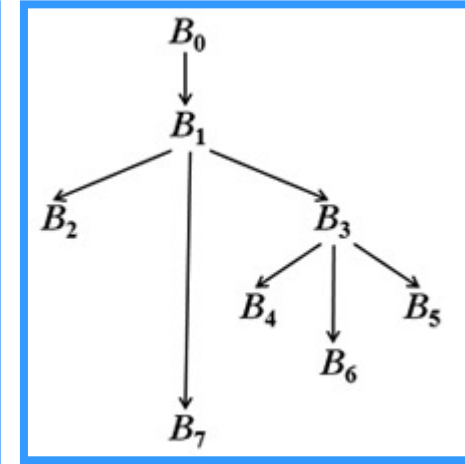
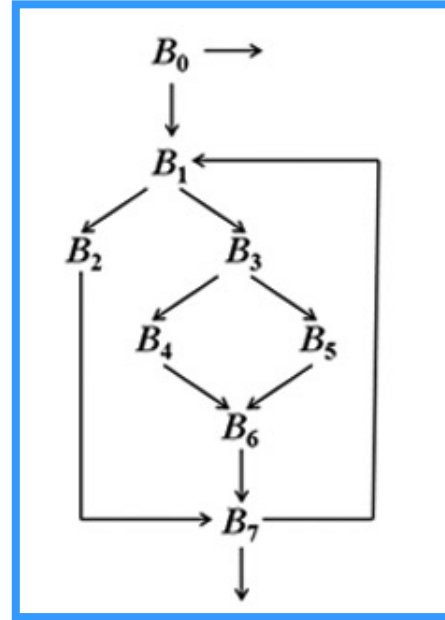
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a \leftarrow \varphi(a, a)$ $b \leftarrow \varphi(b, b)$ $c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B₂	$b \leftarrow$ $c \leftarrow$ $d \leftarrow$	B₃	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B₄	$d \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	3	3	2	2	2
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (\downarrow)	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):

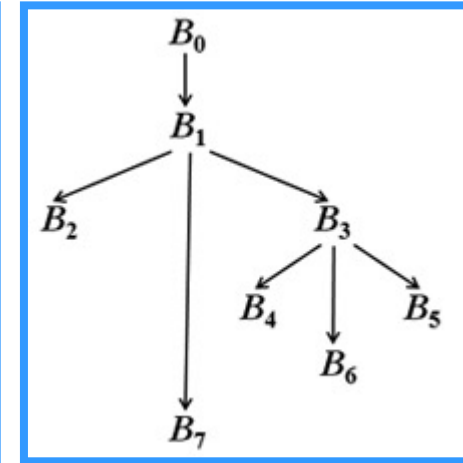
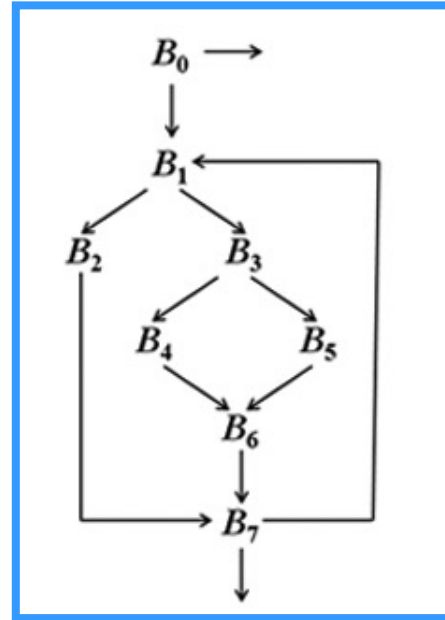
1. Переименование ϕ -функций

B_2	b	\leftarrow
	c	\leftarrow
	d	\leftarrow

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_2	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	3	3	2	2	2
Стеки (\downarrow)	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):

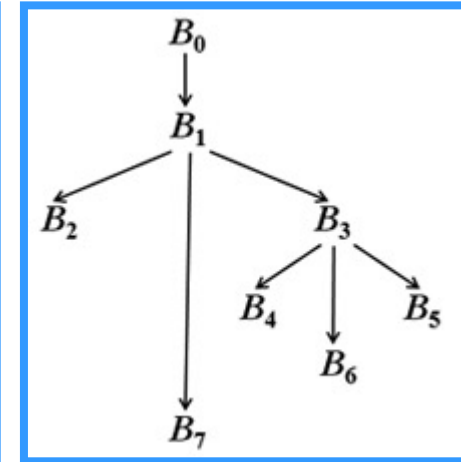
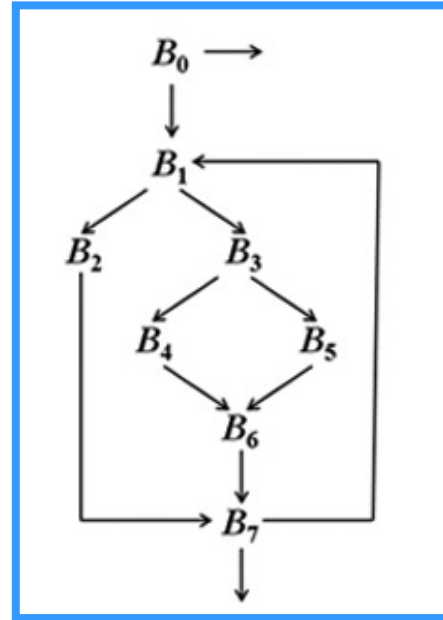
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_2	b	\leftarrow
	c	\leftarrow
	d	\leftarrow

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₂	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	3	4	2	2	2
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	i₁
	a₂	b₂			
	b₃				



Rename(B₂):

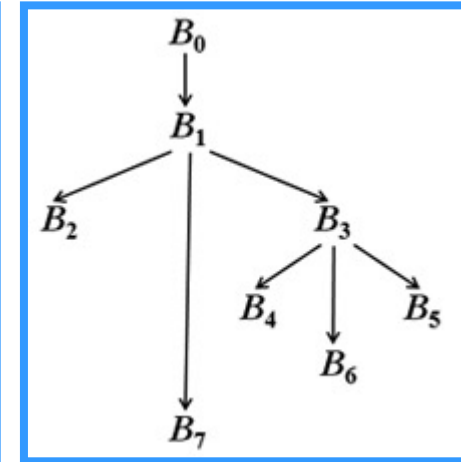
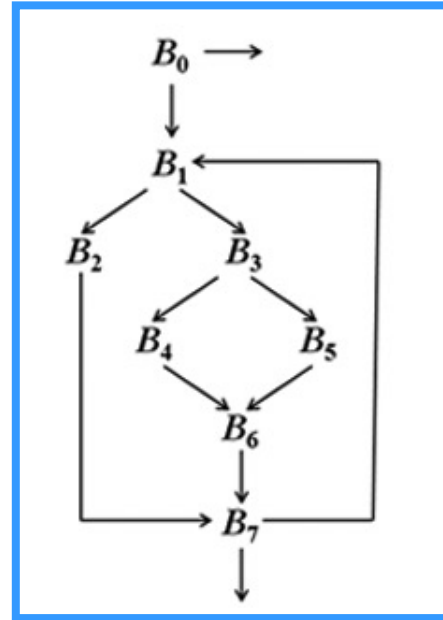
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B₂	b₃ ←
	c ←
	d ←

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 (\downarrow)	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):

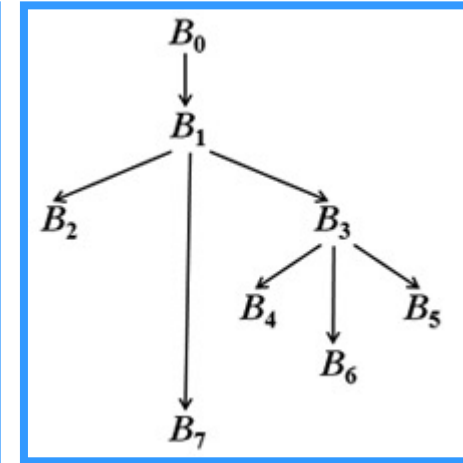
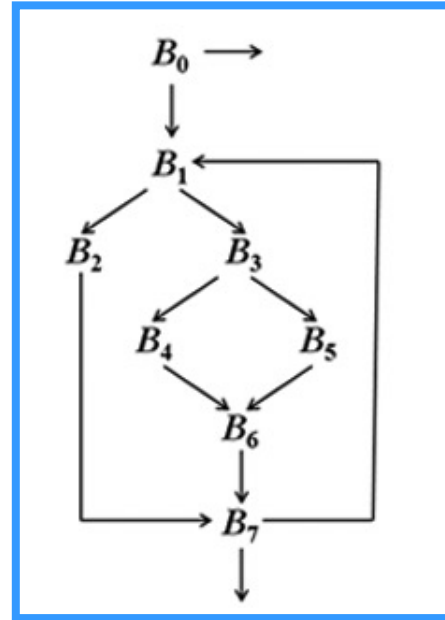
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_2	$b_3 \leftarrow$
	$c_2 \leftarrow$
	$d \leftarrow$

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 (\downarrow)	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):

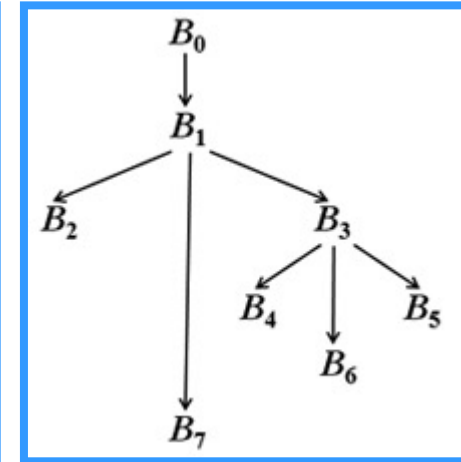
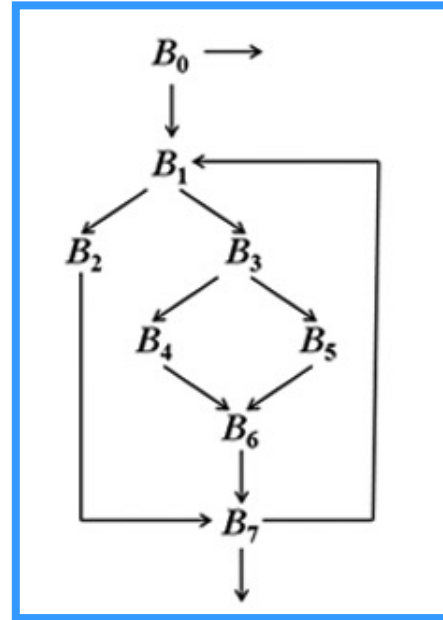
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

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 (\downarrow)	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			



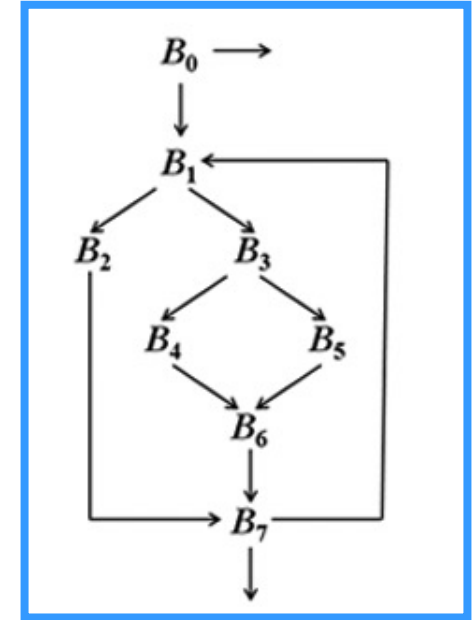
Rename(B_2):

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



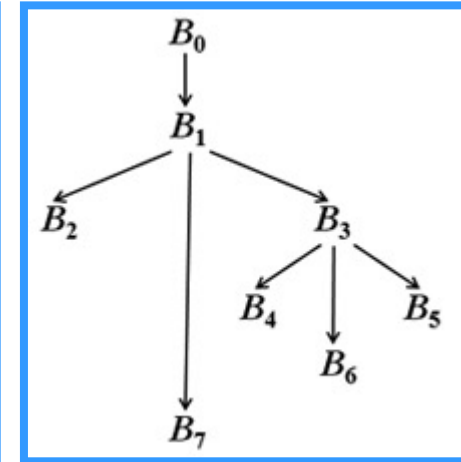
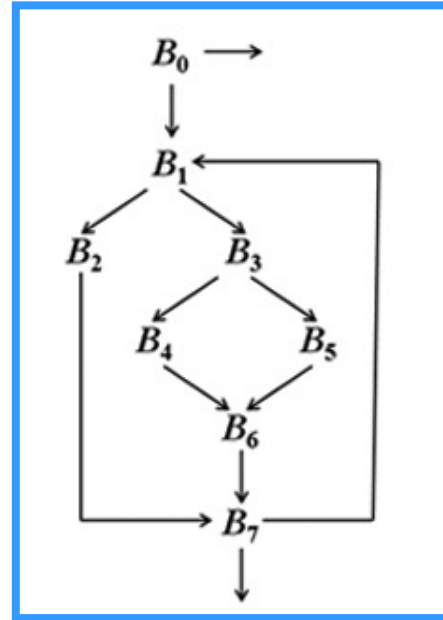
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B₄	$d \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	3	4	3	3	2
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂	c₂	d₂		
	b₃				

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 (\downarrow)	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):

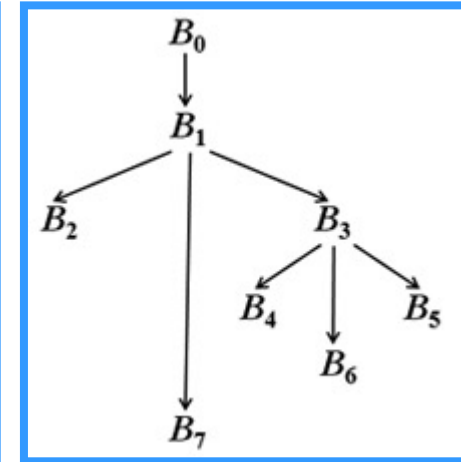
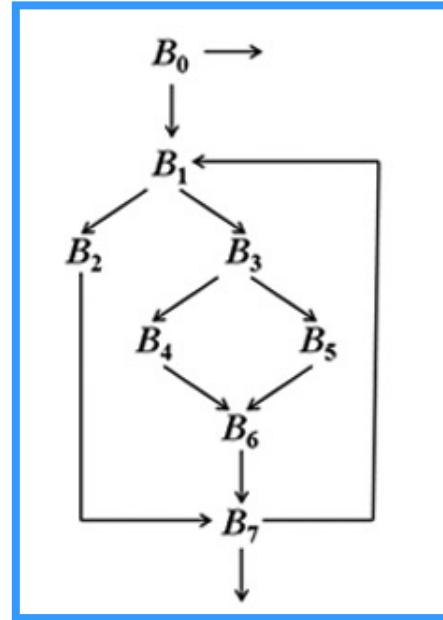
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов

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 (\downarrow)	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):

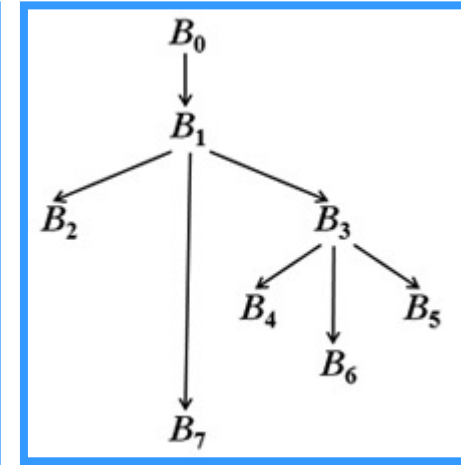
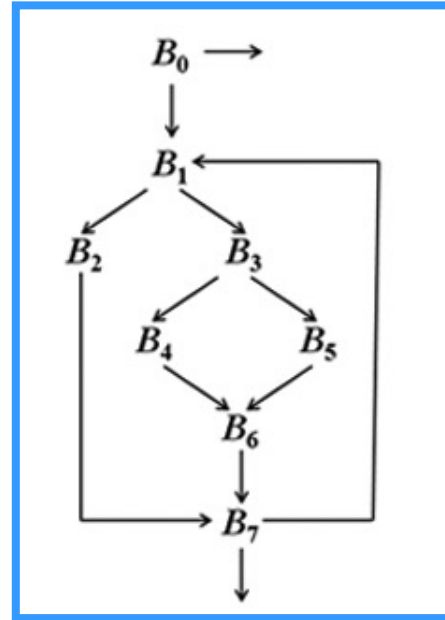
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека

B_2 $b_3 \leftarrow$
 $c_2 \leftarrow$
 $d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

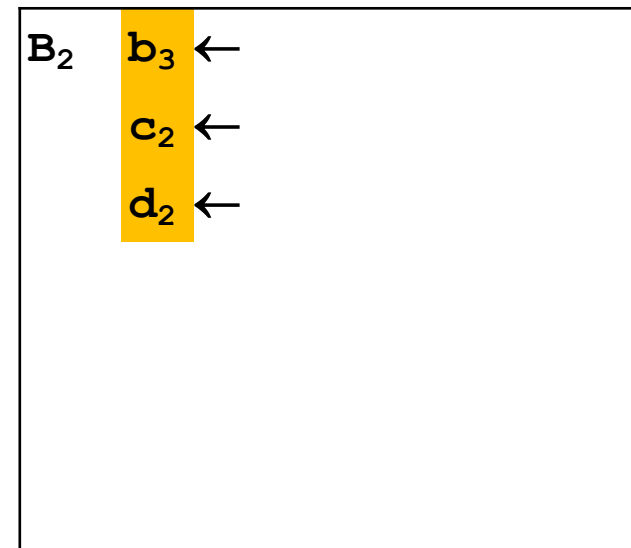
6.3.4. Переименование переменных

B_2	a	b	c	d	i
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (\downarrow)	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):

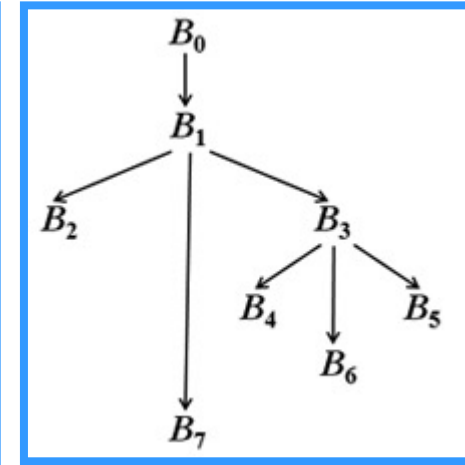
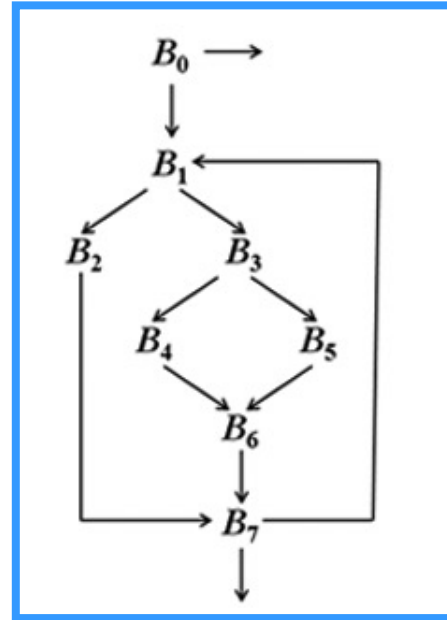
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека



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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			



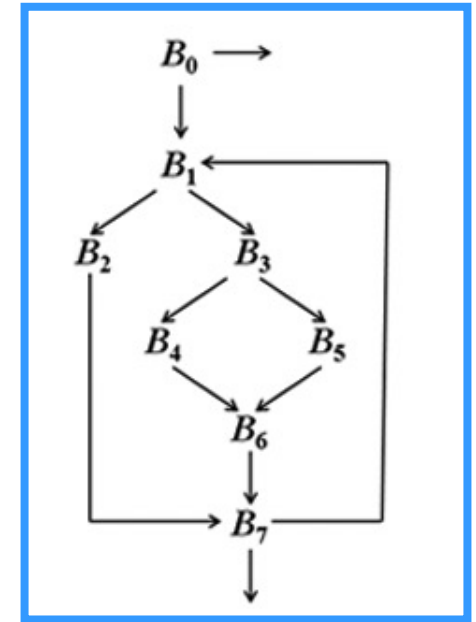
Rename(B_2):

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** // $\rightarrow B_1$

B_2 $b_3 \leftarrow$
 $c_2 \leftarrow$
 $d_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



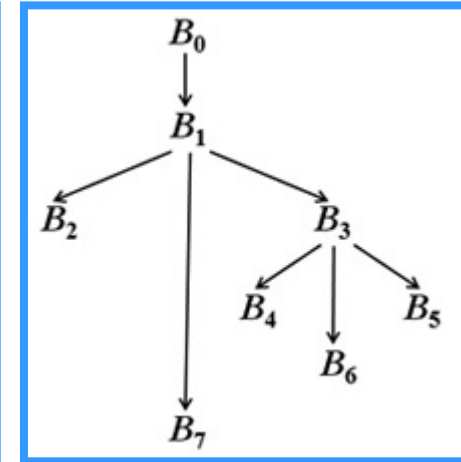
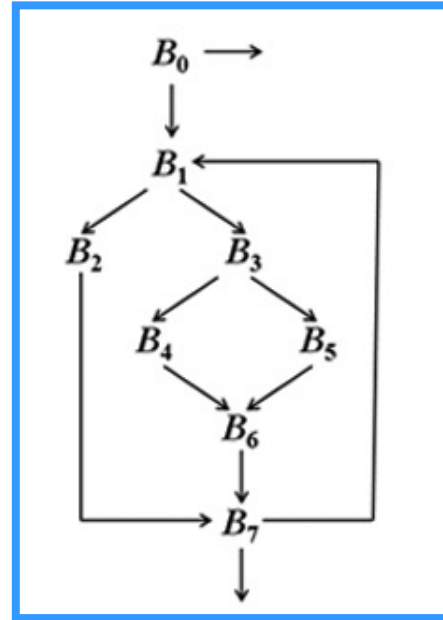
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a, b$ $z \leftarrow +, c, d$ $i \leftarrow +, i, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B₄	$d \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	3	4	3	3	2
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂				

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			



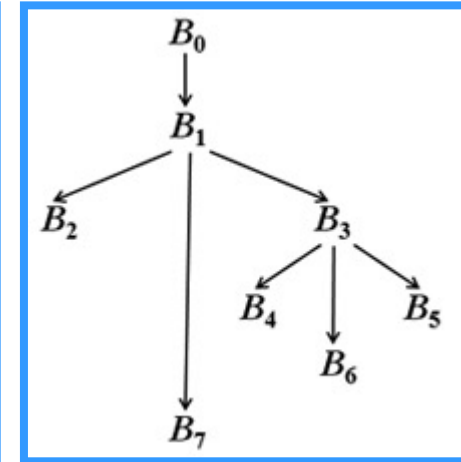
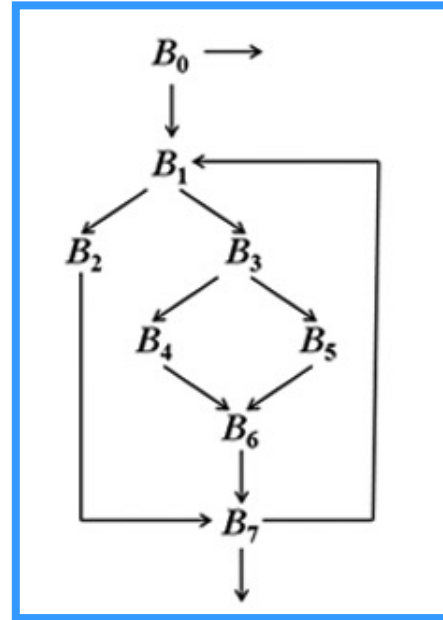
Rename(B_1):

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

B₇	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	3	4	3	3	2
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	i₁
	a₂	b₂			



Rename(B₇):

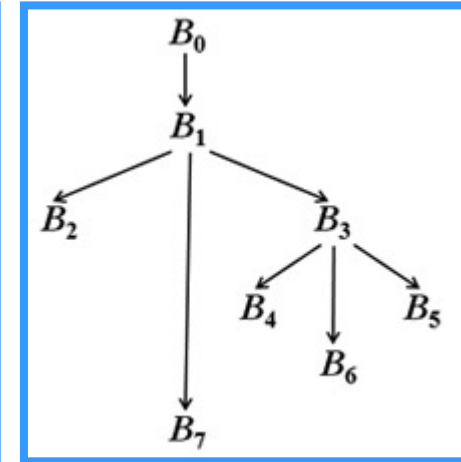
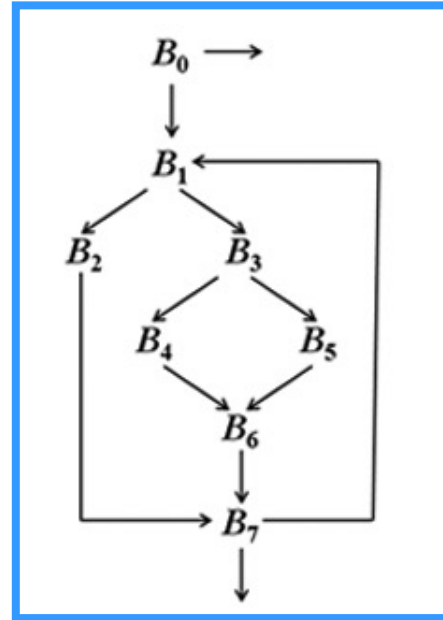
1. Переименование φ-функций

B ₇	a	← 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	4	3	3	2
Стеки (\downarrow)	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):

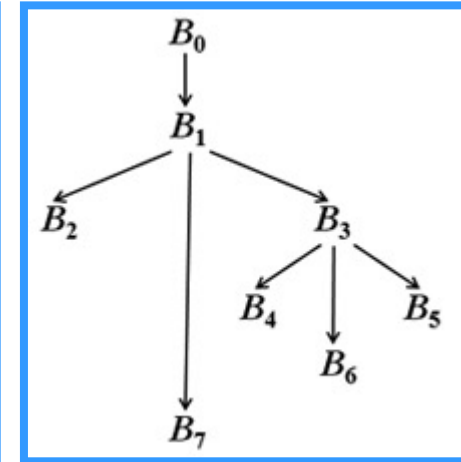
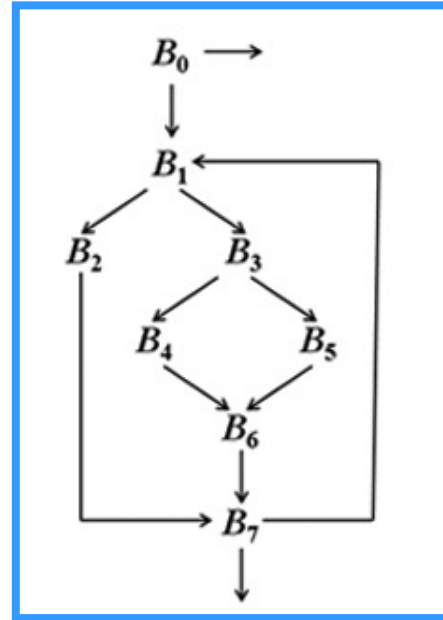
1. Переименование ϕ -функций

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2 , a)$
	$b \leftarrow \phi(b_3 , b)$
	$c \leftarrow \phi(c_2 , c)$
	$d \leftarrow \phi(d_2 , d)$
	$y \leftarrow +, a , b$
	$z \leftarrow +, c , d$
	$i \leftarrow +, i , 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	3	3	2
Стеки (\downarrow)	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):

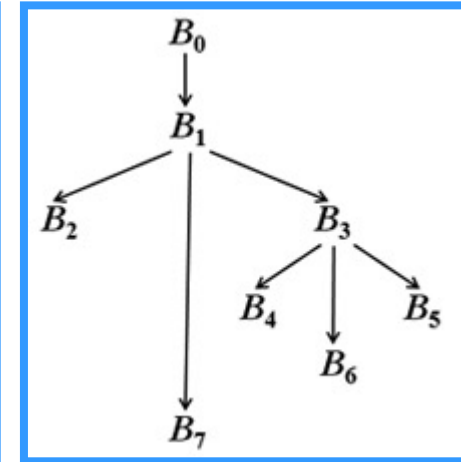
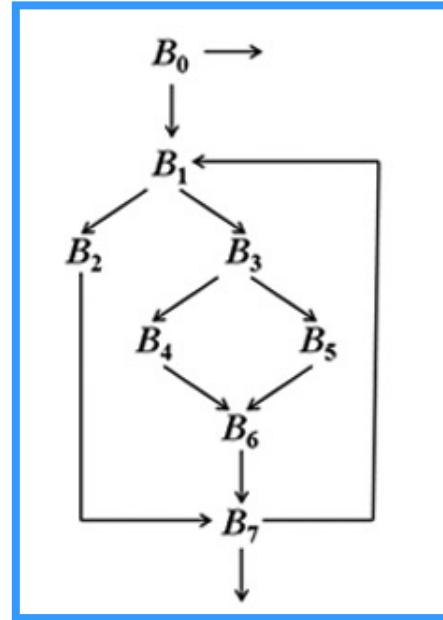
1. Переименование ϕ -функций

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2, a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3, b)$
	$c \leftarrow \phi(c_2, c)$
	$d \leftarrow \phi(d_2, d)$
	$y \leftarrow +, a, b$
	$z \leftarrow +, c, d$
	$i \leftarrow +, i, 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	3	2
Стеки (\downarrow)	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):

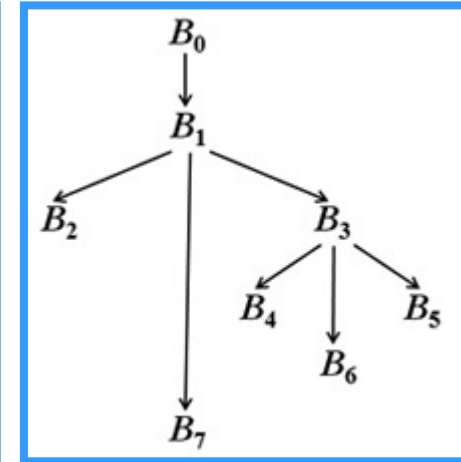
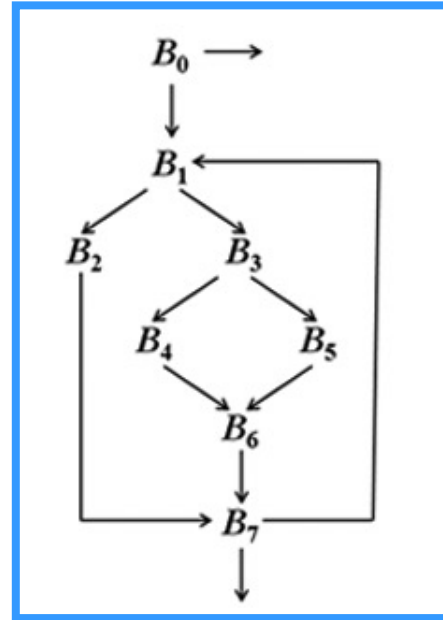
1. Переименование ϕ -функций

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2 , a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3 , b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2 , c)$
	$d \leftarrow \phi(d_2 , d)$
	$y \leftarrow +, a , b$
	$z \leftarrow +, c , d$
	$i \leftarrow +, i , 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₇	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	i₁
	a₂	b₂	c₃	d₃	
	a₃	b₄			



Rename(B₇):

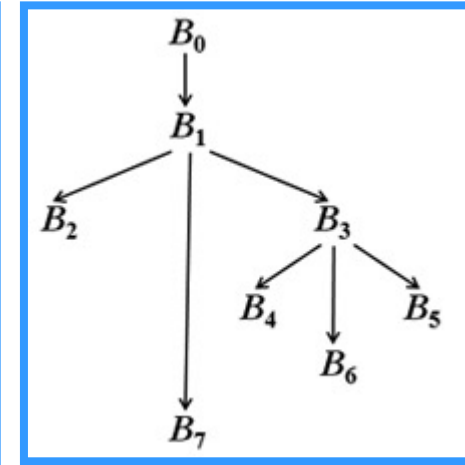
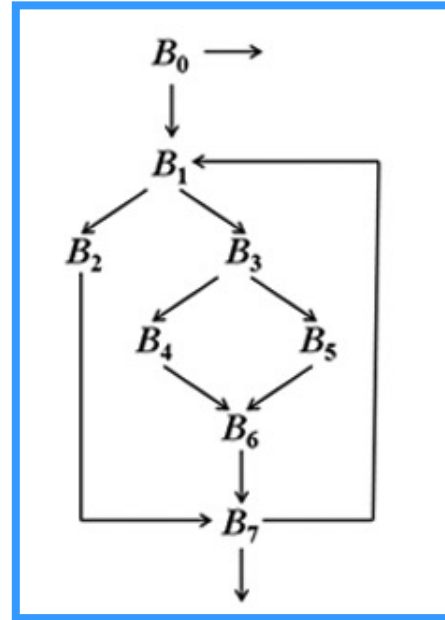
1. Переименование φ-функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B ₇	a ₃	←	φ	(	a ₂	,	a)
	b ₄	←	φ	(	b ₃	,	b)
	c ₃	←	φ	(	c ₂	,	c)
	d ₃	←	φ	(	d ₂	,	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 (\downarrow)	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):

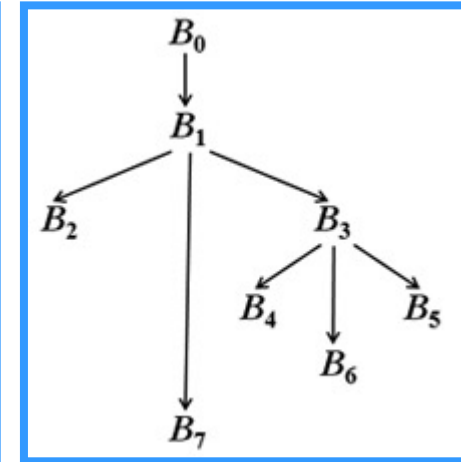
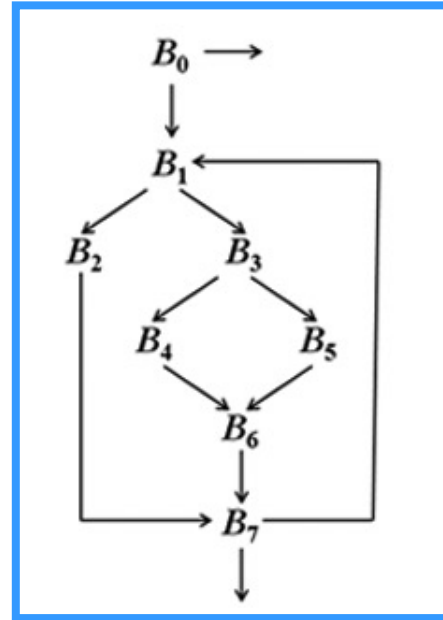
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2, a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3, b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2, c)$
	$d_3 \leftarrow \phi(d_2, d)$
	$y \leftarrow +, a, b$
	$z \leftarrow +, c, d$
	$i \leftarrow +, i, 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (\downarrow)	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):

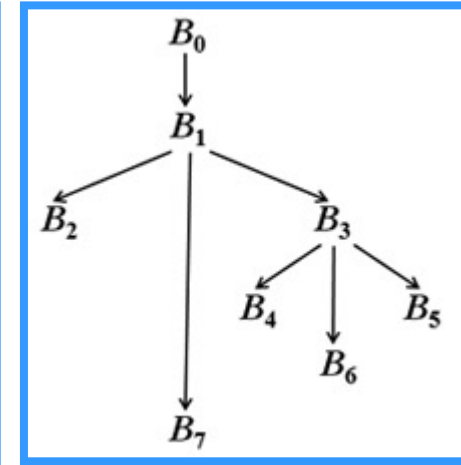
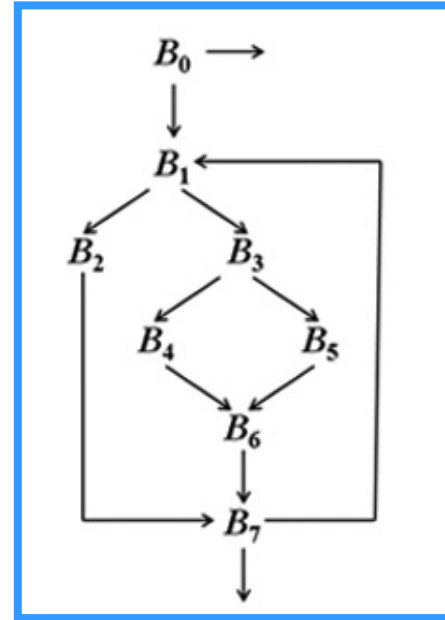
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2 , a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3 , b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2 , c)$
	$d_3 \leftarrow \phi(d_2 , d)$
	$y \leftarrow + , a_3 , b_4$
	$z \leftarrow + , c , d$
	$i \leftarrow + , i , 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_7	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (\downarrow)	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):

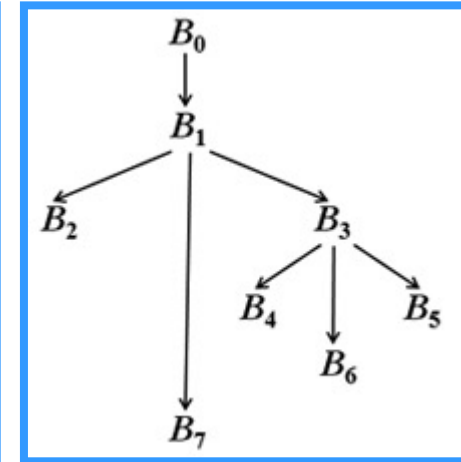
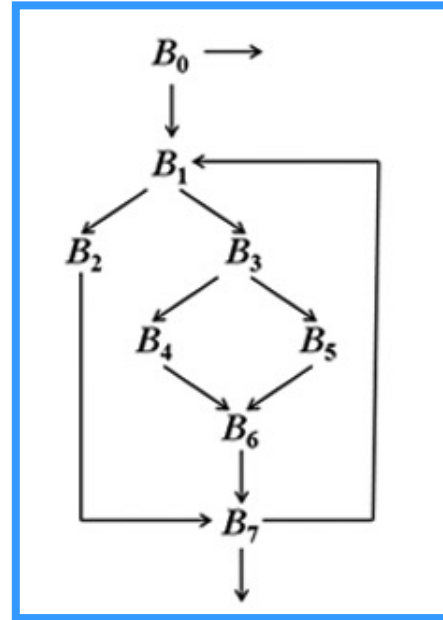
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование
результатирующего операнда
Переменная y
не является глобальной

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2 , a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3 , b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2 , c)$
	$d_3 \leftarrow \phi(d_2 , d)$
	$y \leftarrow + , a_3 , b_4$
	$z \leftarrow + , c , d$
	$i \leftarrow + , i , 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B₇	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	4	5	4	4	2
Стеки (↓)	a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
	a₁	b₁	c₁	d₁	i₁
	a₂	b₂	c₃	d₃	
	a₃	b₄			



Rename(B₇):

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

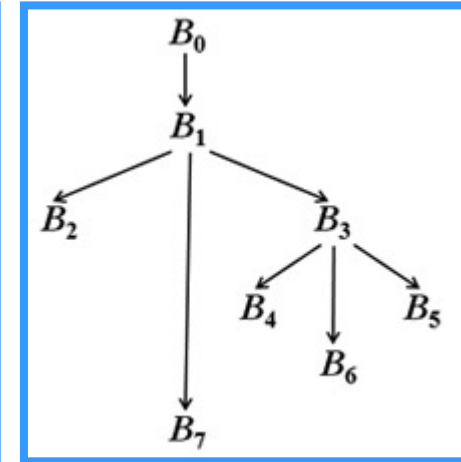
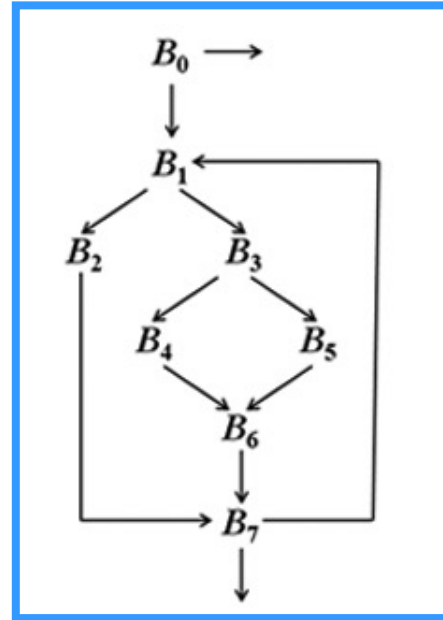
```

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 (\downarrow)	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

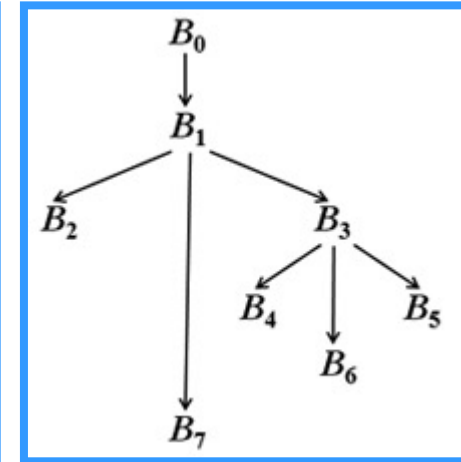
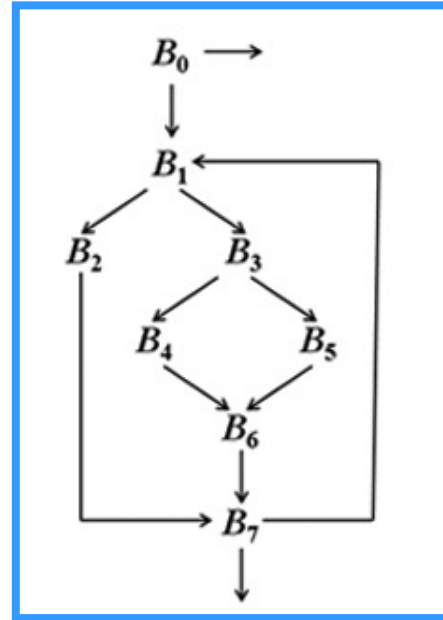
```

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	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (\downarrow)	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			



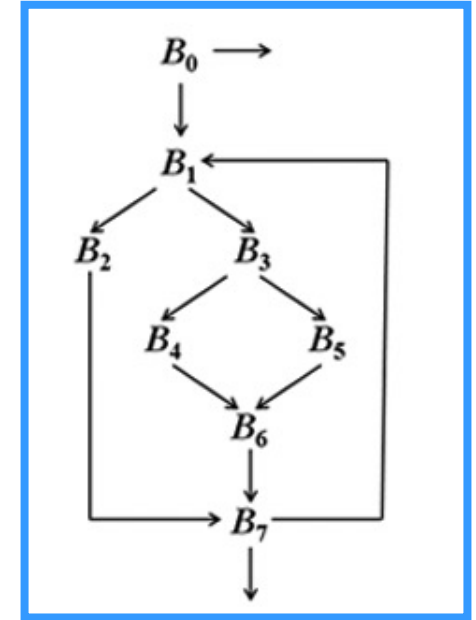
Rename(B_7):

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

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2 , a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3 , b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2 , c)$
	$d_3 \leftarrow \phi(d_2 , d)$
	$y \leftarrow +, a_3 , b_4$
	$z \leftarrow +, c_3 , d_3$
	$i_2 \leftarrow +, i_1 , 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



a b c d i

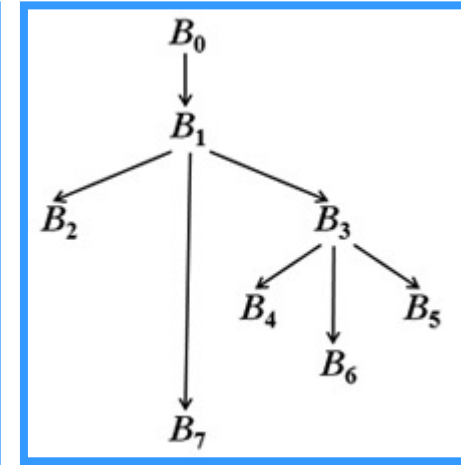
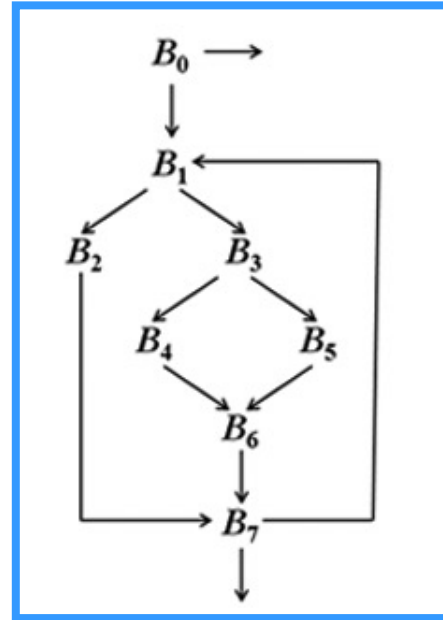
4	5	4	4	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁
a₂	b₂	c₃	d₃	i₂
a₃	b₄			

B₀	i₀ ← 1	B₅	c ←
B₁	a₁ ← φ(a₀ , a₃)	B₇	a₃ ← φ(a₂ , a)
	b₁ ← φ(b₀ , b₄)		b₄ ← φ(b₃ , b)
	c₁ ← φ(c₀ , c₃)		c₃ ← φ(c₂ , c)
	d₁ ← φ(d₀ , d₃)		d₃ ← φ(d₂ , d)
	i₁ ← φ(i₀ , i₂)		y ← +, a₃ , b₄
	a₂ ←		z ← +, c₃ , d₃
	b₂ ←		i₂ ← +, i₁ , 1
B₂	b₃ ←	B₃	a ←
	c₂ ←		d ←
	d₂ ←		
B₄	d ←	B₆	c ← φ(c , c)
			d ← φ(d , d)
			b ←

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 (\downarrow)	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):

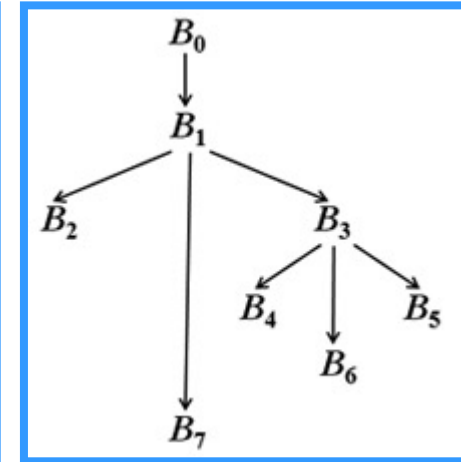
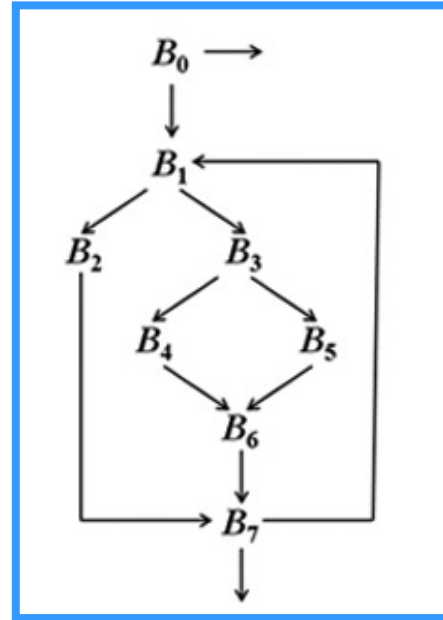
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. **return** // $\rightarrow B_1$

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2, a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3, b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2, c)$
	$d_3 \leftarrow \phi(d_2, d)$
	$y \leftarrow +, a_3, b_4$
	$z \leftarrow +, c_3, d_3$
	$i_2 \leftarrow +, i_1, 1$

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
	a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
	a_2	b_2			



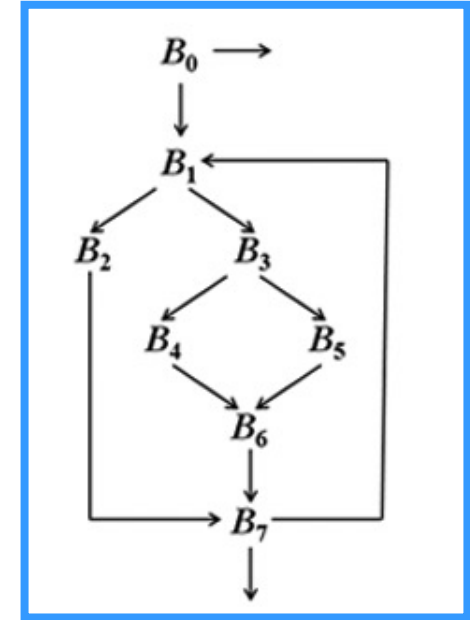
Rename(B_7):

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** // $\rightarrow B_1$

B_7	$a_3 \leftarrow \phi(a_2 , a)$
	$b_4 \leftarrow \phi(b_3 , b)$
	$c_3 \leftarrow \phi(c_2 , c)$
	$d_3 \leftarrow \phi(d_2 , d)$
	$y \leftarrow +, a_3 , b_4$
	$z \leftarrow +, c_3 , d_3$
	$i_2 \leftarrow +, i_1 , 1$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



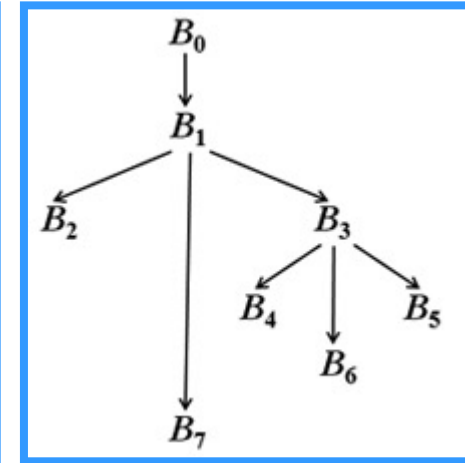
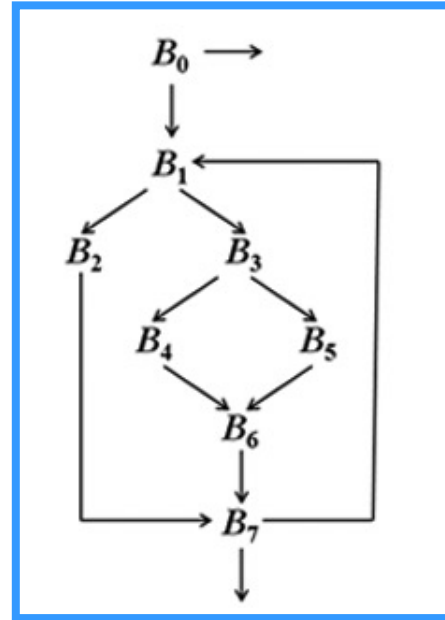
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a \leftarrow$ $d \leftarrow$
B₄	$d \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	4	5	4	4	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂				

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

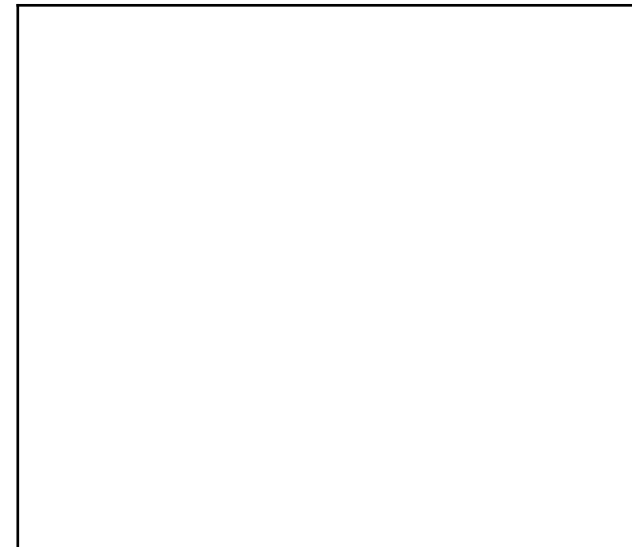
6.3.4. Переименование переменных

B_1	a	b	c	d	i
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (\downarrow)	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):

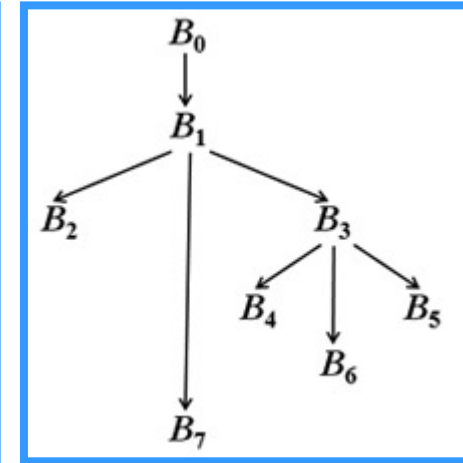
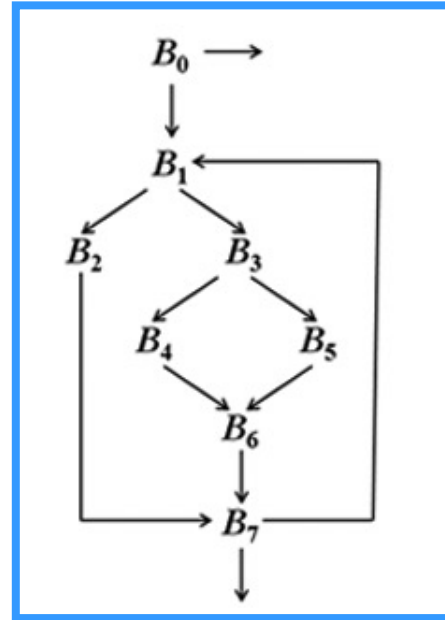
- **Rename**(B_2) // Done
- **Rename**(B_7) // Done
- **Rename**(B_3)



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (\downarrow)	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):

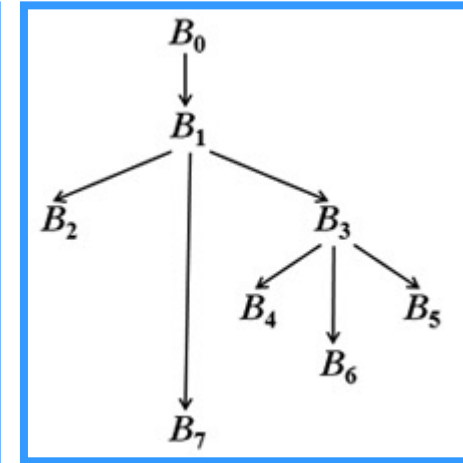
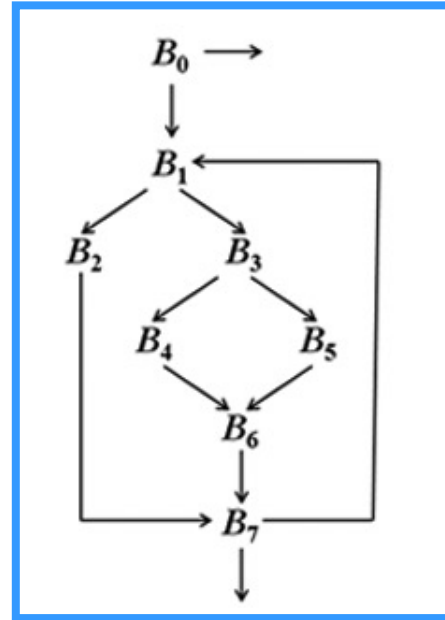
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_3	<i>a</i>	←
	<i>d</i>	←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	4	5	4	4	3
Стеки (\downarrow)	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):

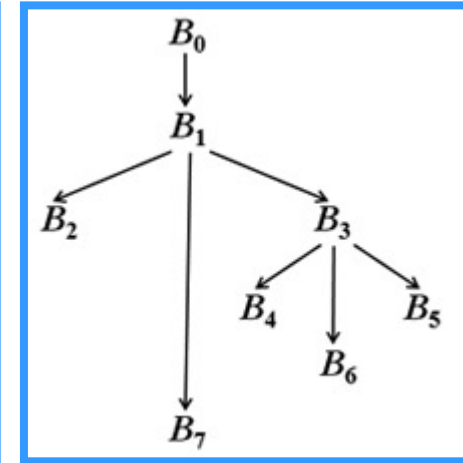
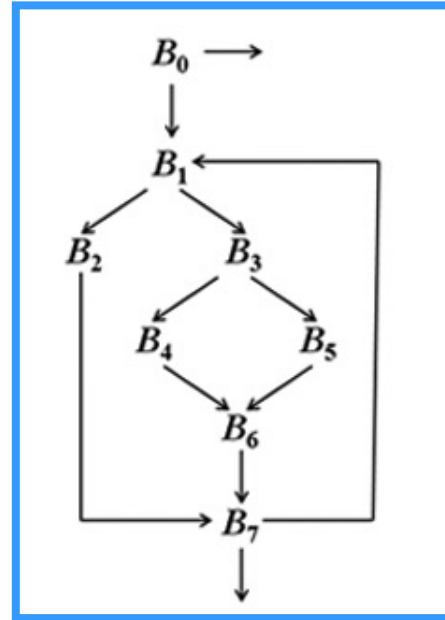
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_3	a	←
	d	←

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
Счетчики	5	5	4	4	3
Стеки (\downarrow)	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):

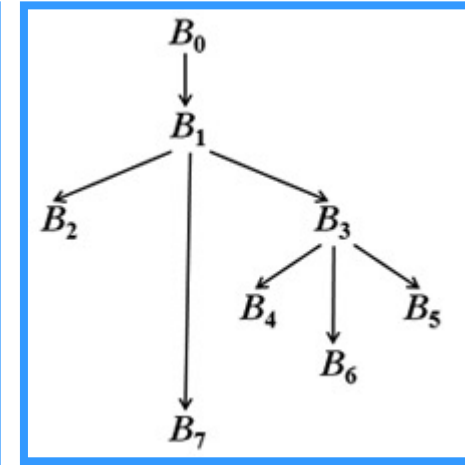
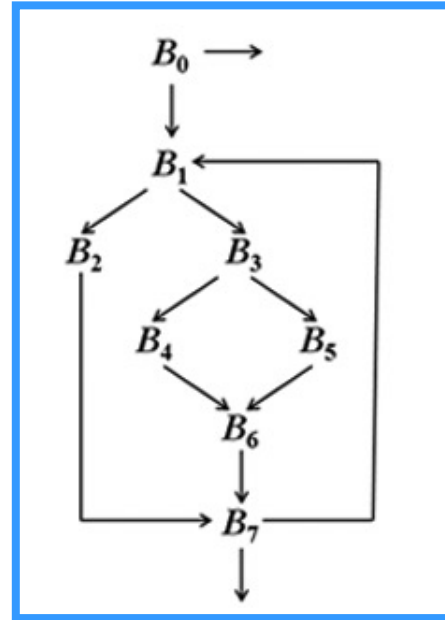
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_3	a_4 ←
	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 (\downarrow)	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):

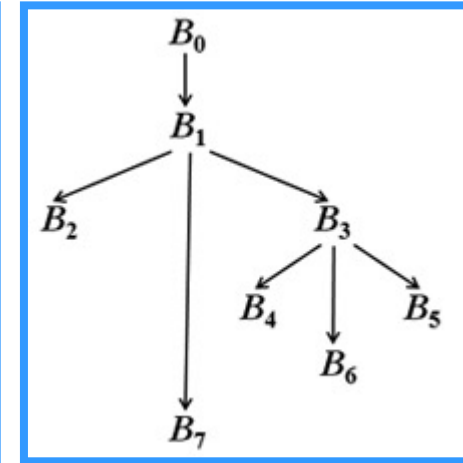
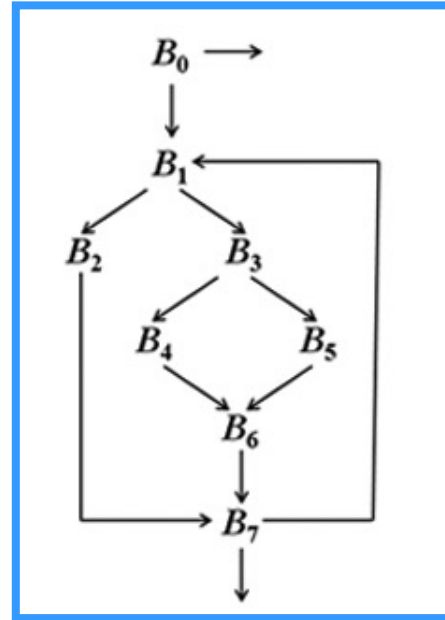
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG

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	5	3
Стеки (\downarrow)	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):

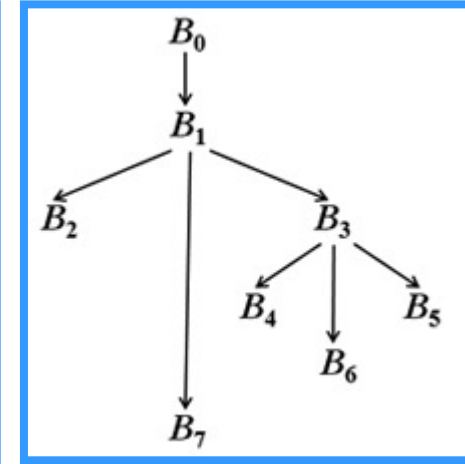
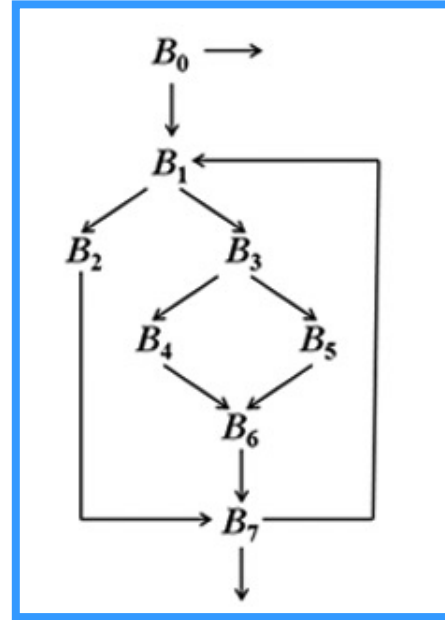
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Rename потомков в дереве доминаторов

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	5	3
Стеки (\downarrow)	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				



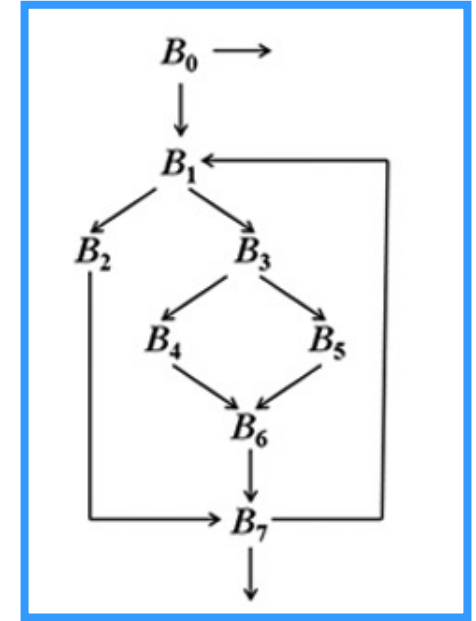
Rename(B_1):

- **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



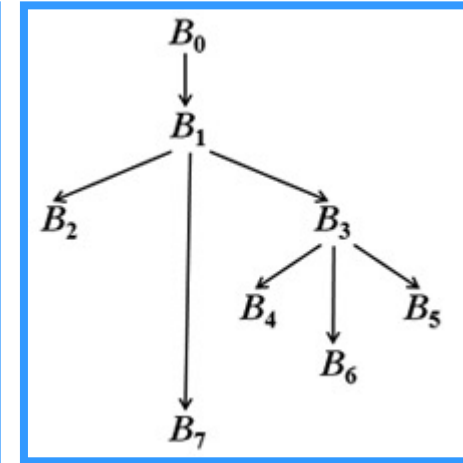
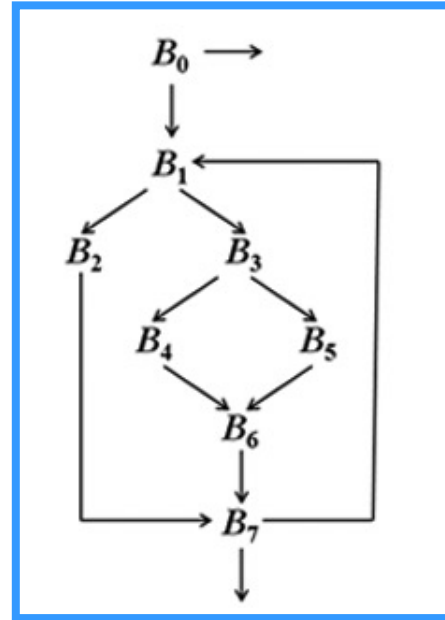
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c, c)$ $d \leftarrow \varphi(d, d)$ $b \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	5	4	5	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂		d₄		

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

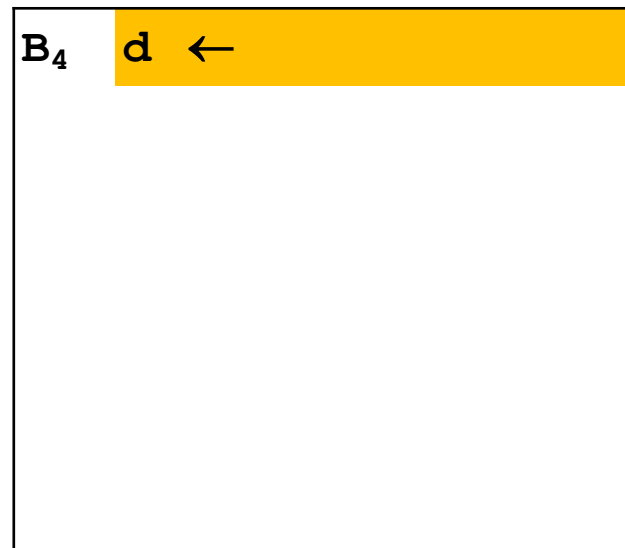
6.3.4. Переименование переменных

B_4	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	5	3
Стеки (\downarrow)	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):

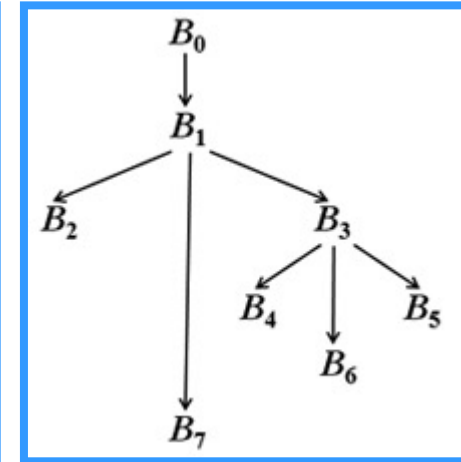
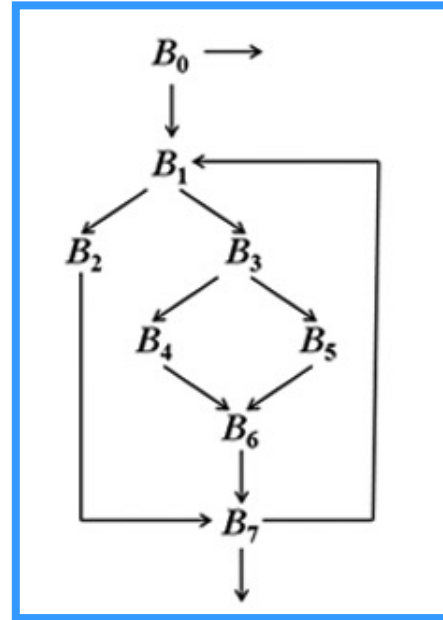
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

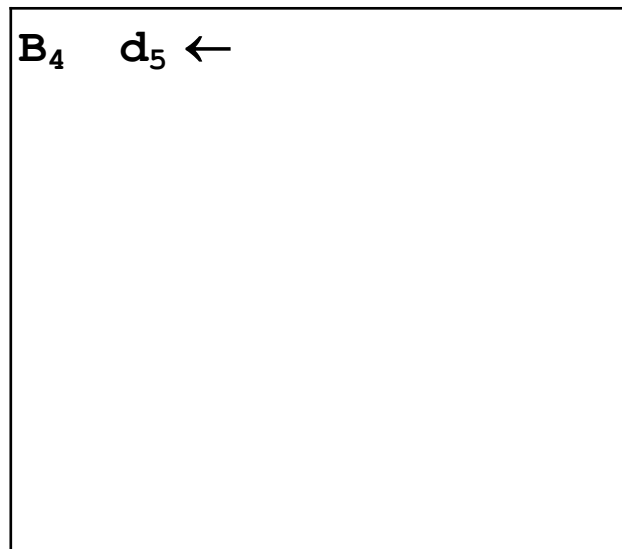
6.3.4. Переименование переменных

B_4	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (\downarrow)	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	



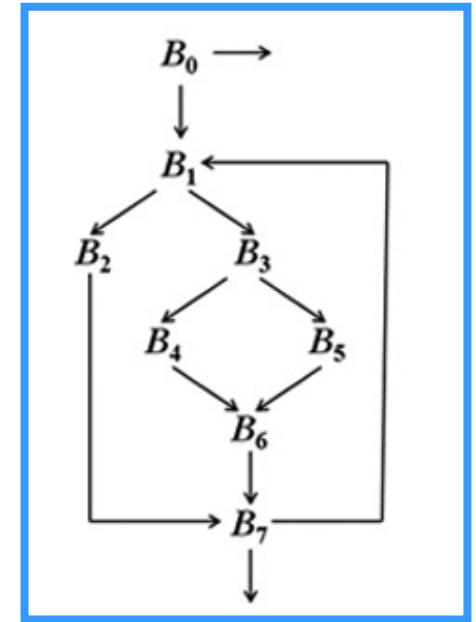
Rename(B_4):

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



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



a b c d i

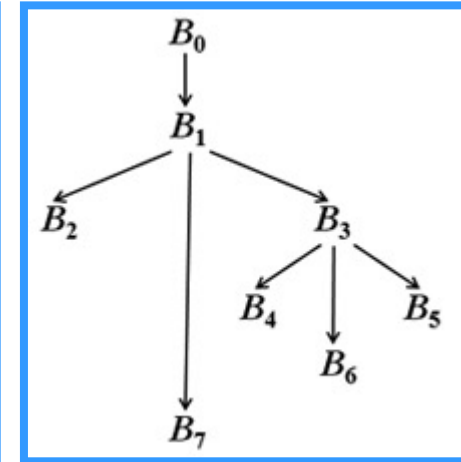
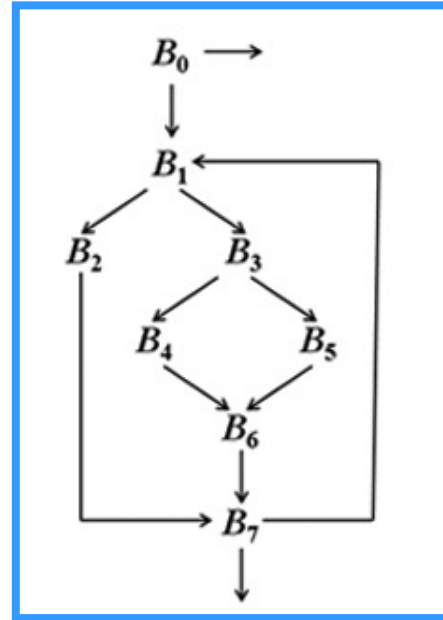
5	5	4	6	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4			d_5	

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	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B_4	$d_5 \leftarrow$	B_6	$c \leftarrow \varphi(c_1, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_5, d)$ $b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

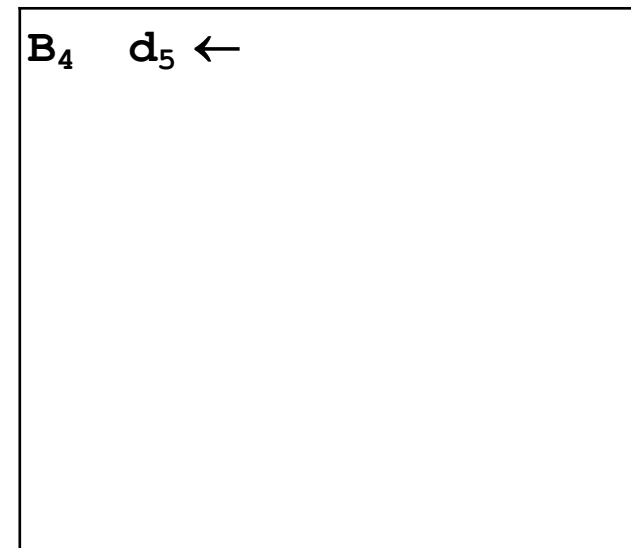
6.3.4. Переименование переменных

B_4	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	4	6	3
Стеки (\downarrow)	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):

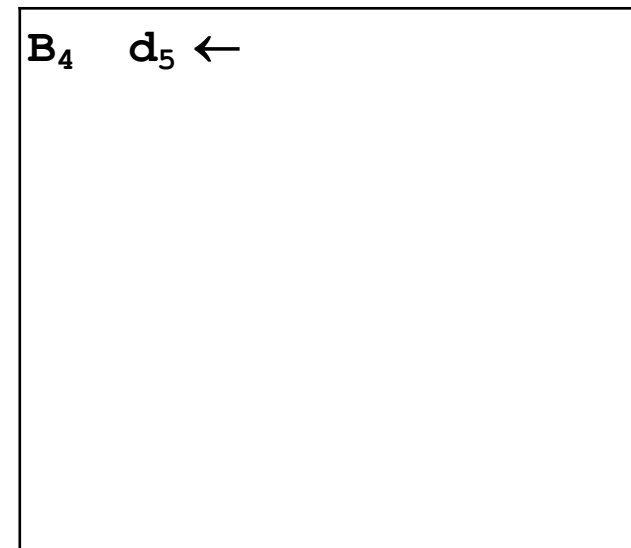
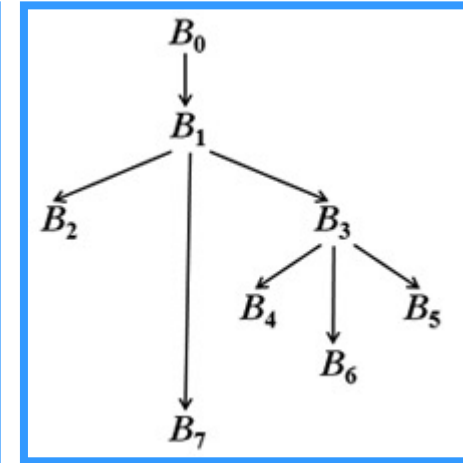
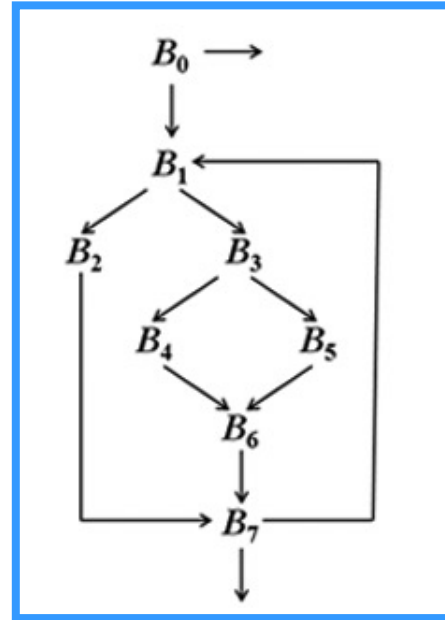
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Нет потомков в дереве доминаторов
5. Очистка стека. **return** // $\rightarrow B_3$



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 (\downarrow)	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				

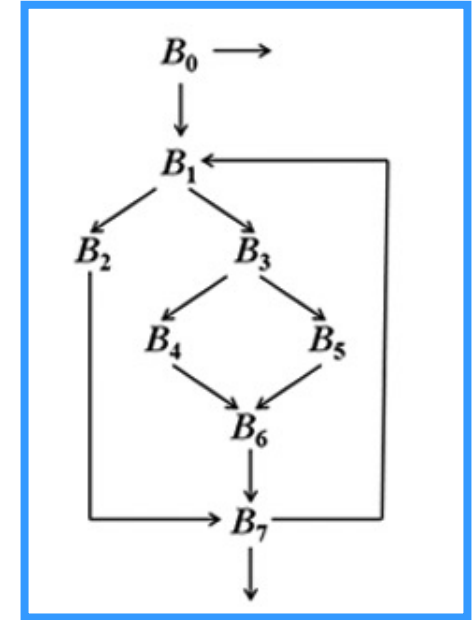


Rename(B_4):

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** // $\rightarrow B_3$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



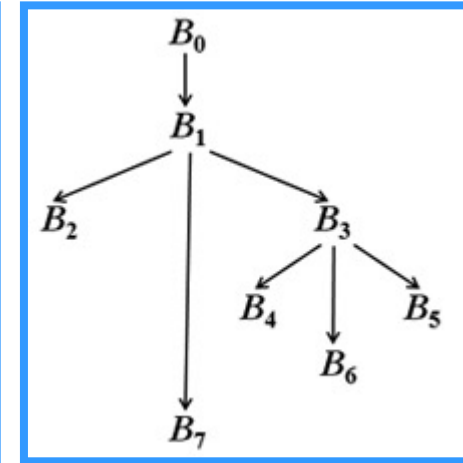
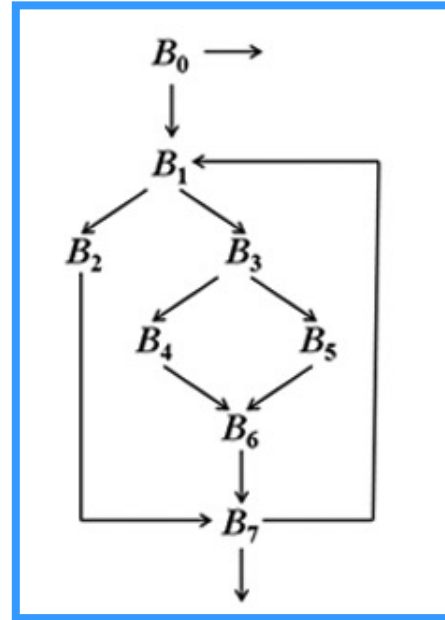
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d_5 \leftarrow$	B₆	$c \leftarrow \varphi(c_1, c)$ $d \leftarrow \varphi(d_5, d)$ $b \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	5	4	6	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂		d₄		
a₄					

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 (\downarrow)	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):

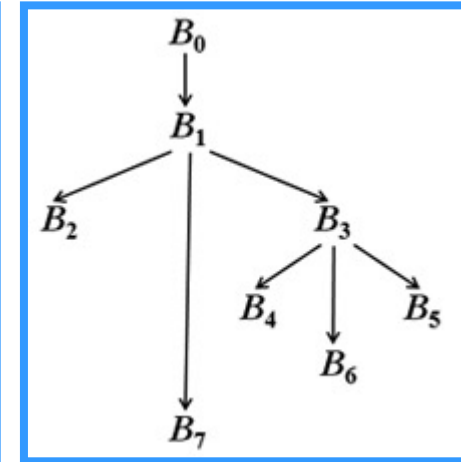
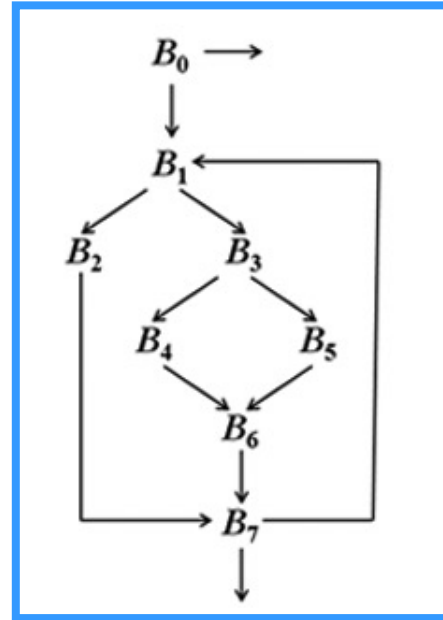
- **Rename(B_2)** // Done
- **Rename(B_7)** // Done
- **Rename(B_3)**
 - **Rename(B_4)**
 - **Rename(B_6)**

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 (\downarrow)	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

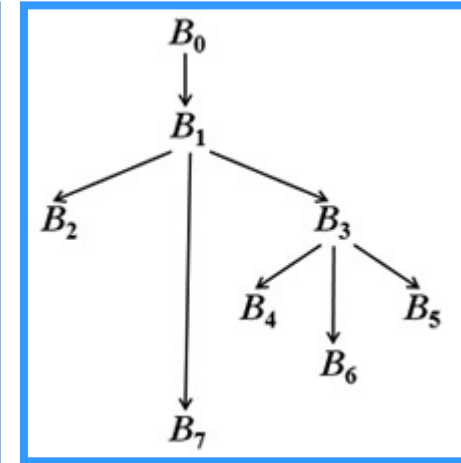
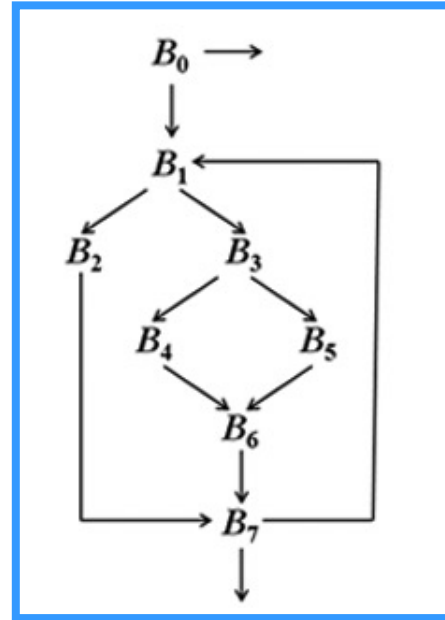
```

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


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 (\downarrow)	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):

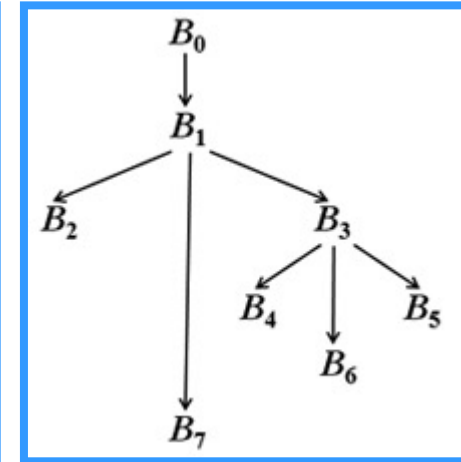
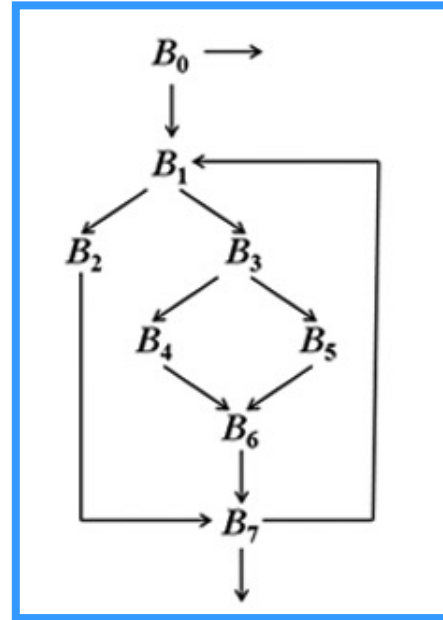
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда

B_6 $c_4 \leftarrow \phi(c_1 , c)$
 $d \leftarrow \phi(d_5 , d)$
 $b \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

B_3	a	b	c	d	i
Счетчики	5	5	5	7	3
Стеки (\downarrow)	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

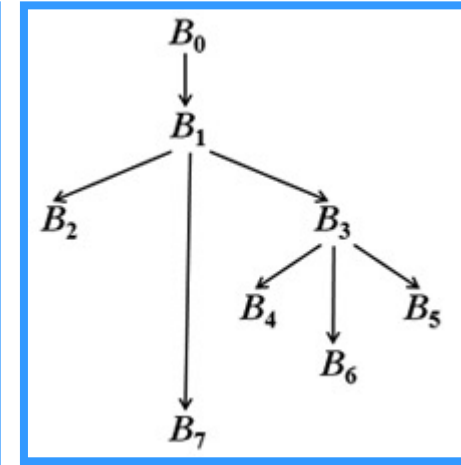
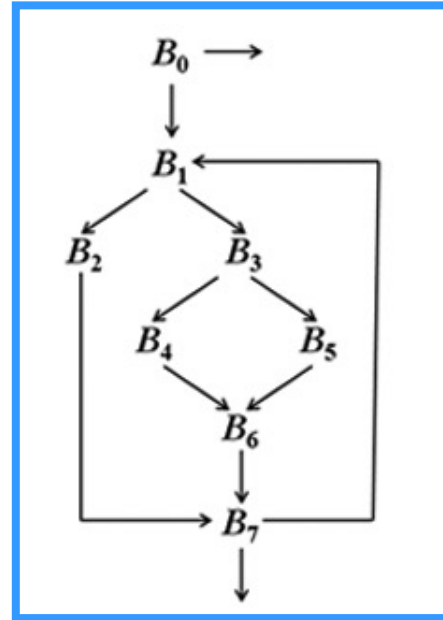
```

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 (\downarrow)	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	



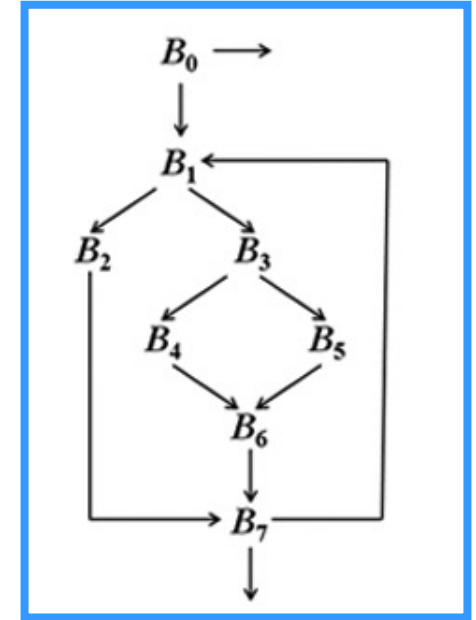
Rename(B_6):

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

B_6 $c_4 \leftarrow \phi(c_1, c)$
 $d_6 \leftarrow \phi(d_5, d)$
 $b_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



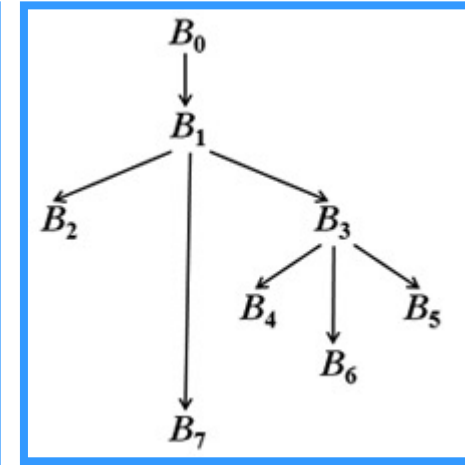
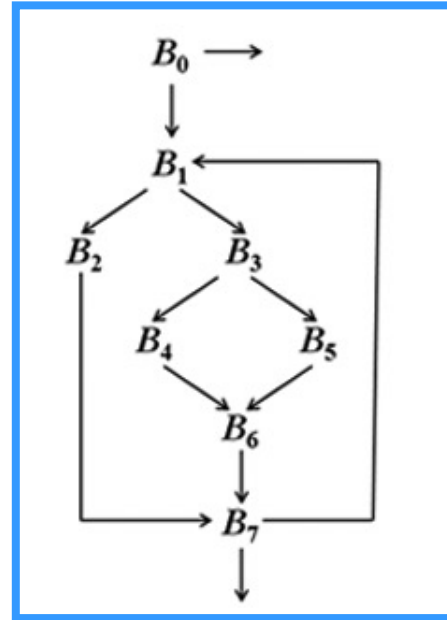
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d_5 \leftarrow$	B₆	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d)$ $b_5 \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	6	5	7	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂	c₄	d₄		
a₄	b₅		d₆		

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 (\downarrow)	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				



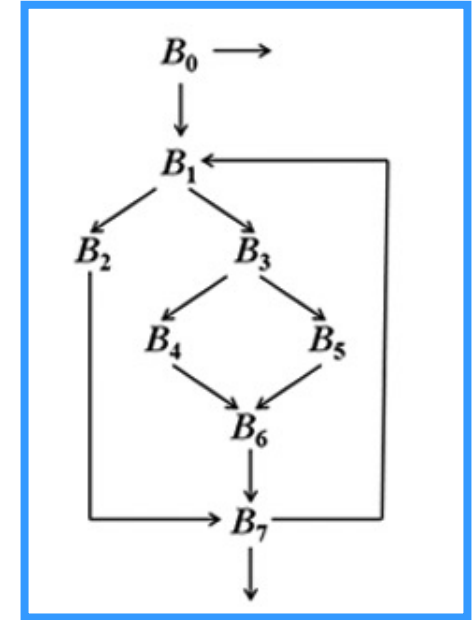
Rename(B_6):

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** // $\rightarrow B_3$

B_6 $c_4 \leftarrow \phi(c_1, c)$
 $d_6 \leftarrow \phi(d_5, d)$
 $b_5 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



a *b* *c* *d* *i*

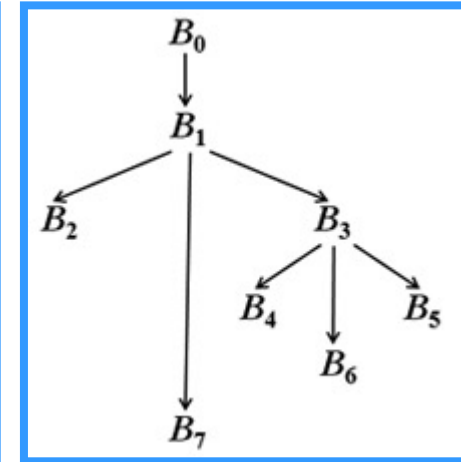
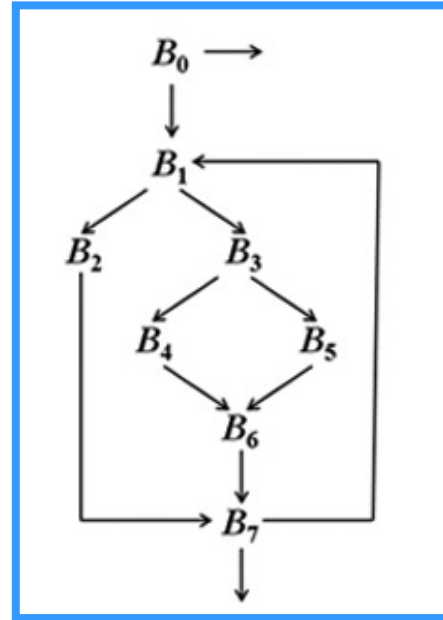
5	6	5	7	3
a_0	b_0	c_0	d_0	i_0
a_1	b_1	c_1	d_1	i_1
a_2	b_2		d_4	
a_4				

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	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d)$ $b_5 \leftarrow$

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 (\downarrow)	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):

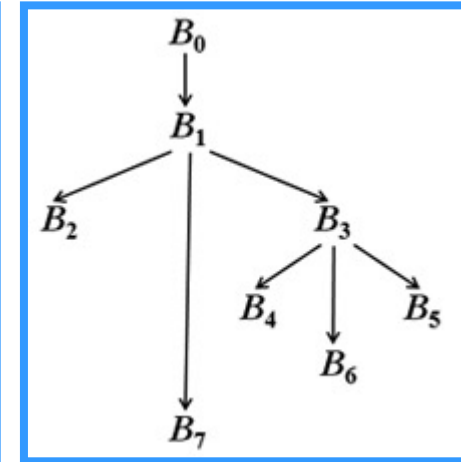
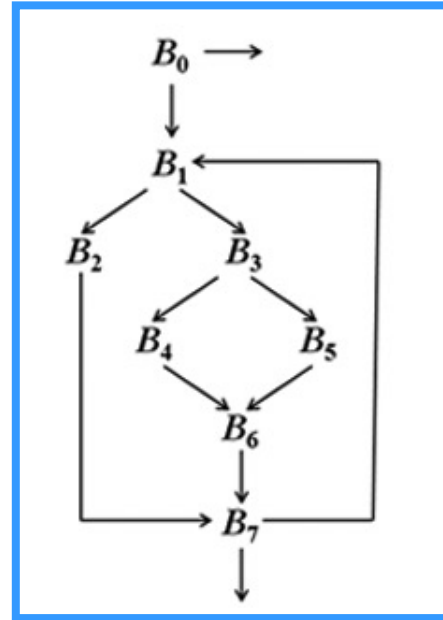
- **Rename(B_2)** // Done
- **Rename(B_7)** // Done
- **Rename(B_3)**
 - **Rename(B_4)**
 - **Rename(B_6)**
 - **Rename(B_5)**

B_3	$a_4 \leftarrow$
	$d_4 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

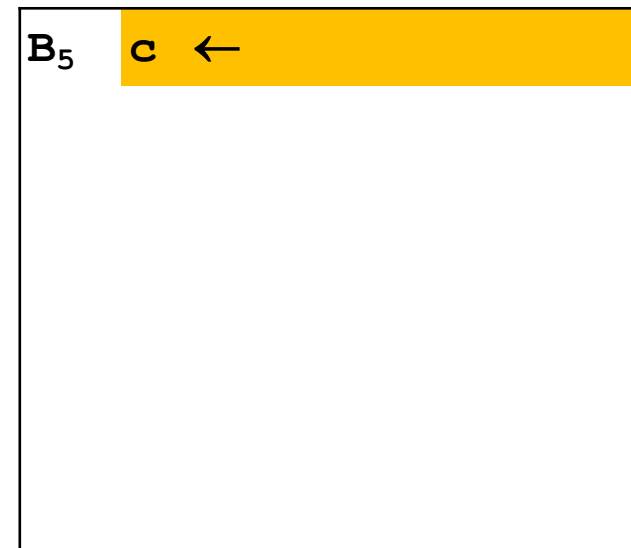
6.3.4. Переименование переменных

B_5	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	5	7	3
Стеки (\downarrow)	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):

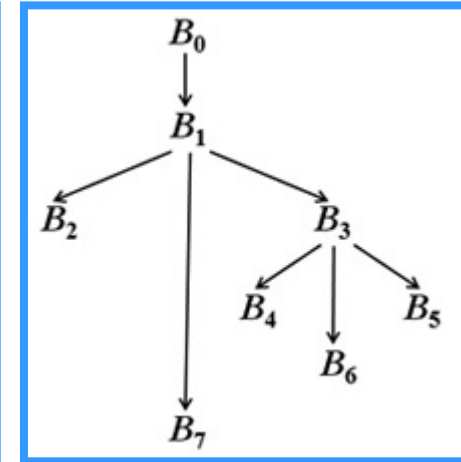
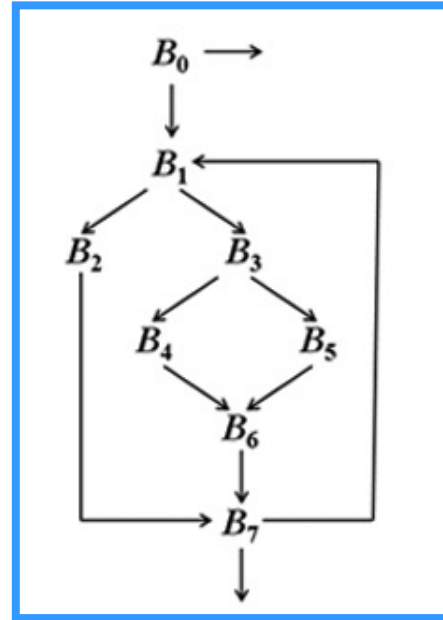
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

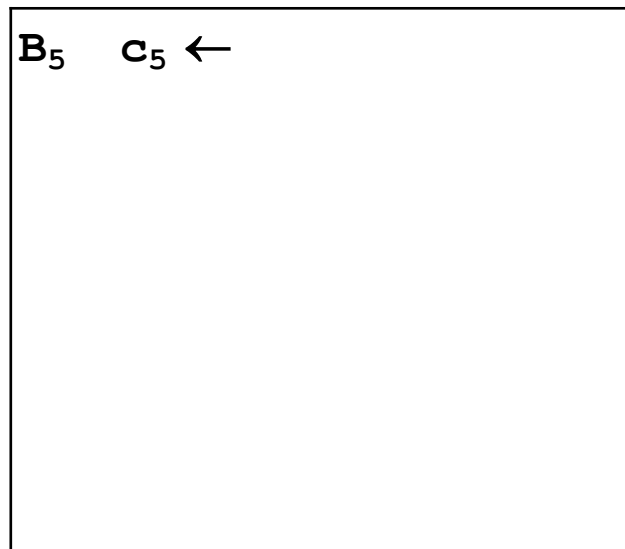
6.3.4. Переименование переменных

B_5	a	b	c	d	i
Счетчики	5	6	6	7	3
Стеки (\downarrow)	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				



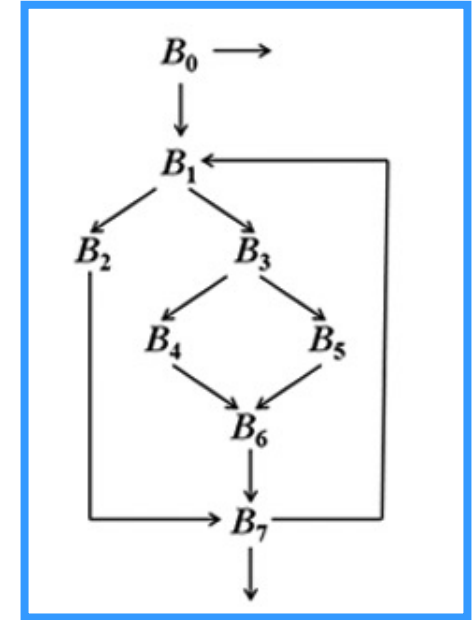
Rename(B_5):

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



6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



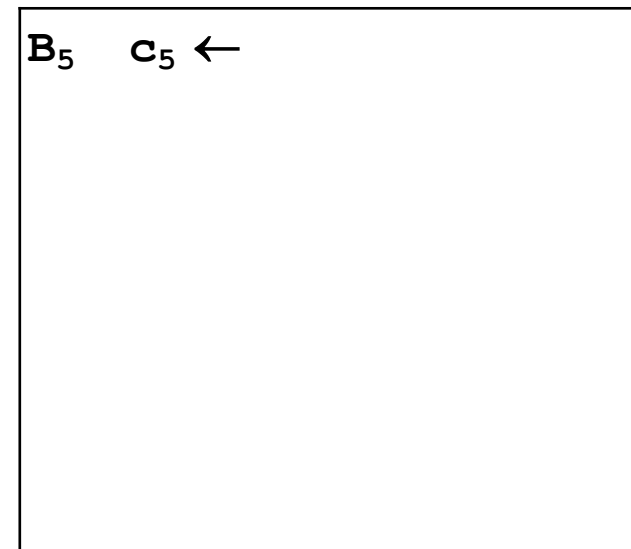
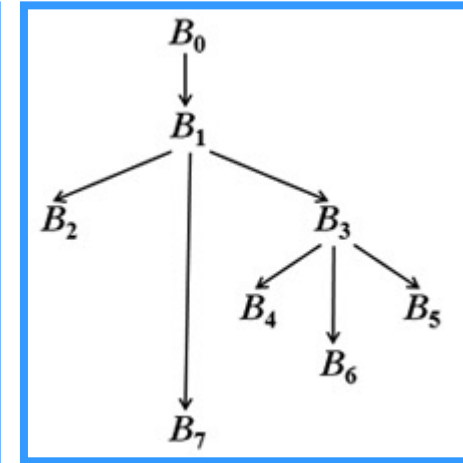
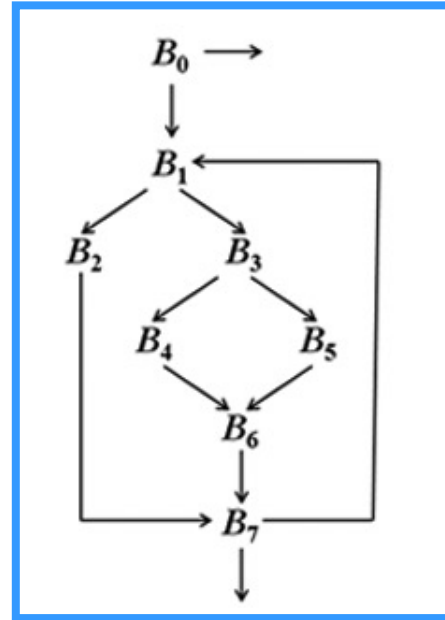
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c_5 \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d_5 \leftarrow$	B₆	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	6	6	7	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂	c₅	d₄		
a₄					

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 (\downarrow)	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				

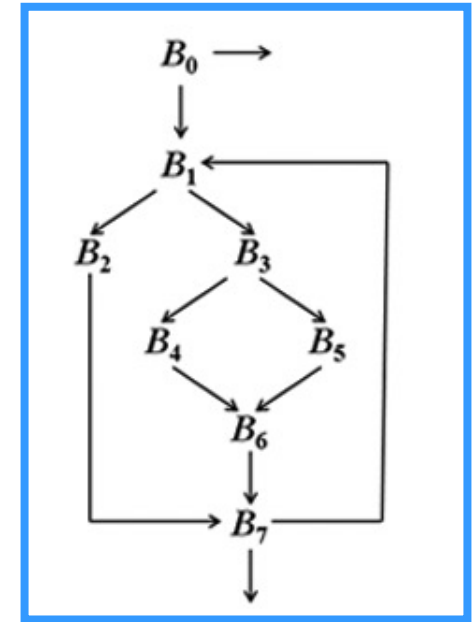


Rename(B_5):

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** // $\rightarrow B_3$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



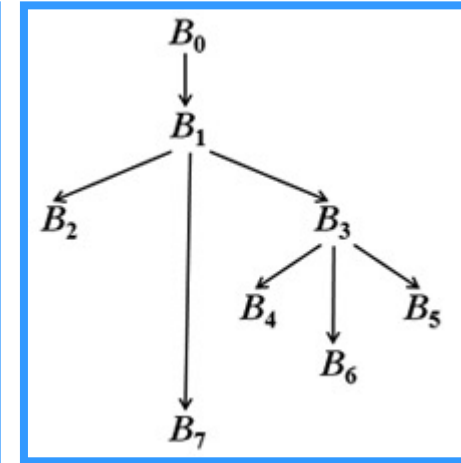
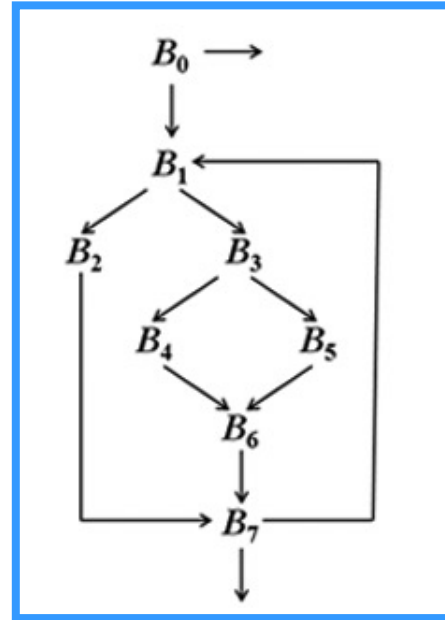
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c_5 \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d_5 \leftarrow$	B₆	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	6	6	7	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	
a₁	b₁	c₁	d₁	i₁	
a₂	b₂		d₄		
a₄					

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 (\downarrow)	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):

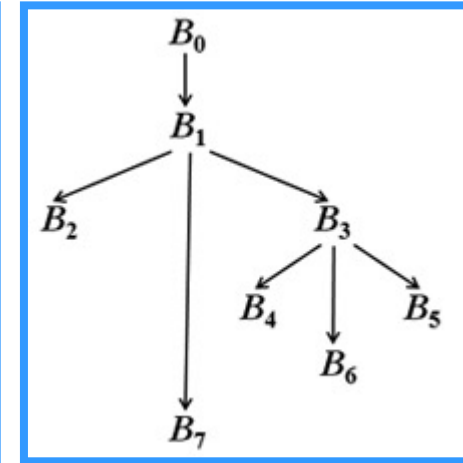
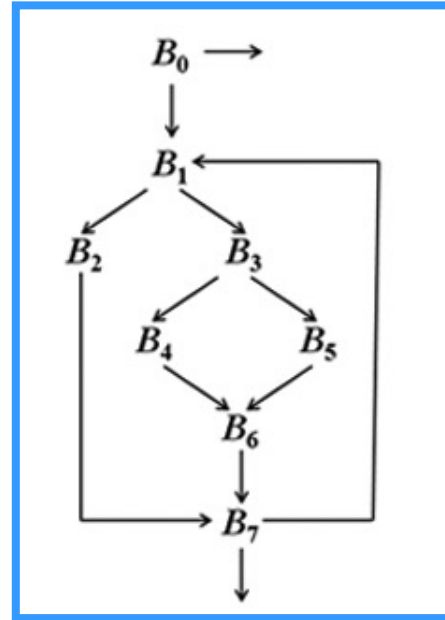
- **Rename(B_2)** // Done
- **Rename(B_7)** // Done
- **Rename(B_3)**
 - **Rename(B_4)**
 - **Rename(B_6)**
 - **Rename(B_5)**

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 (\downarrow)	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):

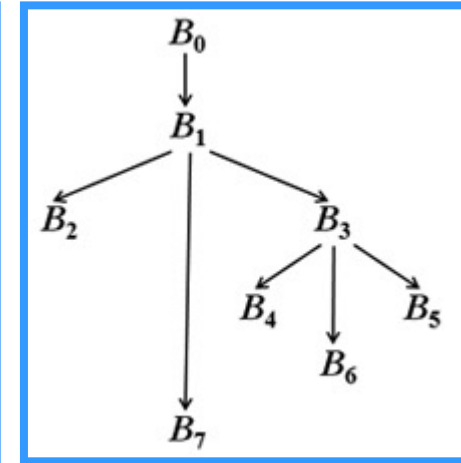
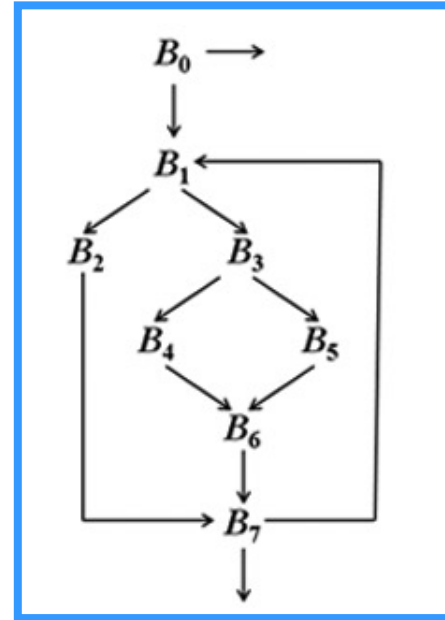
1. Переименование ϕ -функций
2. Переименование инструкций
 1. Переименование операндов
 2. Переименование результирующего операнда
3. Заполнение параметров ϕ -функций в потомках в CFG
4. Rename потомков в в дереве дом.
5. Очистка стека. **return** B_1

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	i_0



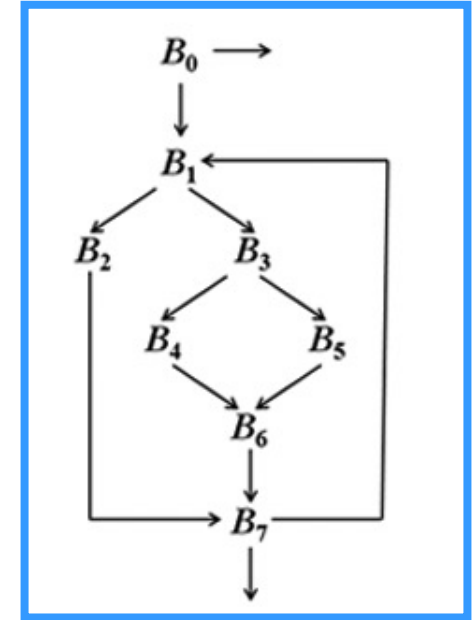
Rename(B_1):

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

B_1 $a_1 \leftarrow \phi(a_0 , a_3)$
 $b_1 \leftarrow \phi(b_0 , b_4)$
 $c_1 \leftarrow \phi(c_0 , c_3)$
 $d_1 \leftarrow \phi(d_0 , d_3)$
 $i_1 \leftarrow \phi(i_0 , i_2)$
 $a_2 \leftarrow$
 $b_2 \leftarrow$

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



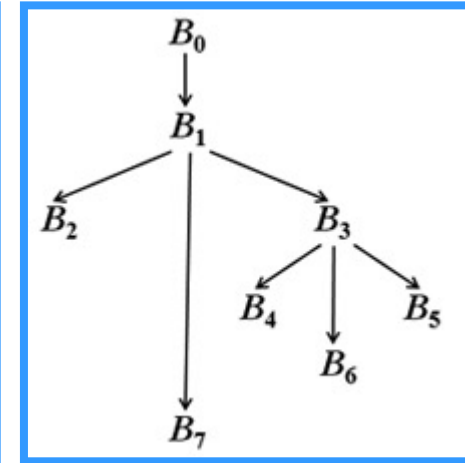
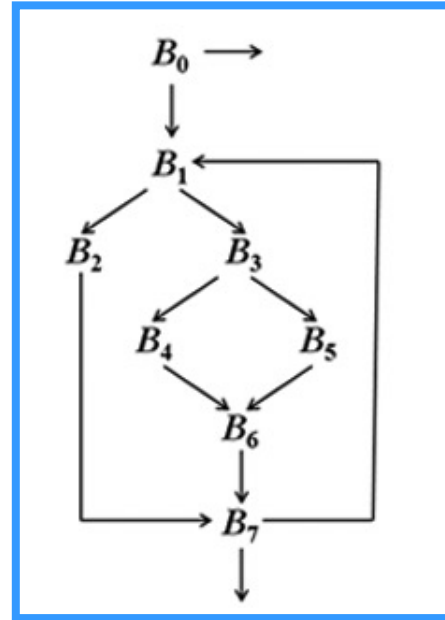
B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c_5 \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d_5 \leftarrow$	B₆	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	6	6	7	3
a₀	b₀	c₀	d₀	i₀	

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 (\downarrow)	a_0	b_0	c_0	d_0	



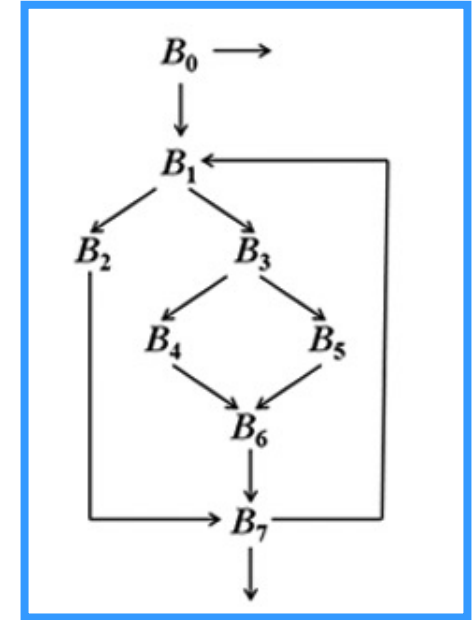
Rename(B_0):

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**

```
 $B_0$   $i_0 \leftarrow 1$ 
```

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных



B₀	$i_0 \leftarrow 1$	B₅	$c_5 \leftarrow$
B₁	$a_1 \leftarrow \varphi(a_0, a_3)$ $b_1 \leftarrow \varphi(b_0, b_4)$ $c_1 \leftarrow \varphi(c_0, c_3)$ $d_1 \leftarrow \varphi(d_0, d_3)$ $i_1 \leftarrow \varphi(i_0, i_2)$ $a_2 \leftarrow$ $b_2 \leftarrow$	B₇	$a_3 \leftarrow \varphi(a_2, a_4)$ $b_4 \leftarrow \varphi(b_3, b_5)$ $c_3 \leftarrow \varphi(c_2, c_4)$ $d_3 \leftarrow \varphi(d_2, d_6)$ $y \leftarrow +, a_3, b_4$ $z \leftarrow +, c_3, d_3$ $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$
B₂	$b_3 \leftarrow$ $c_2 \leftarrow$ $d_2 \leftarrow$	B₃	$a_4 \leftarrow$ $d_4 \leftarrow$
B₄	$d_5 \leftarrow$	B₆	$c_4 \leftarrow \varphi(c_1, c_5)$ $d_6 \leftarrow \varphi(d_5, d_4)$ $b_5 \leftarrow$

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>i</i>
	5	6	6	7	3
a₀	b₀	c₀	d₀		

6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

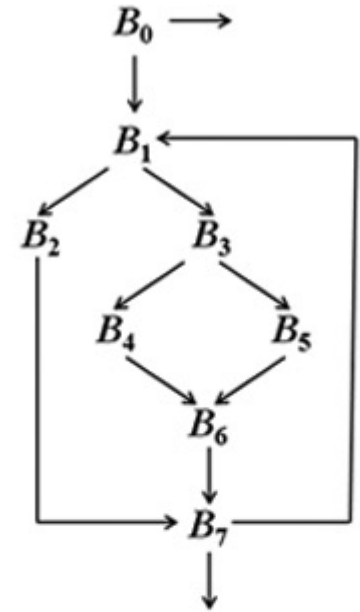
Блок B_0

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

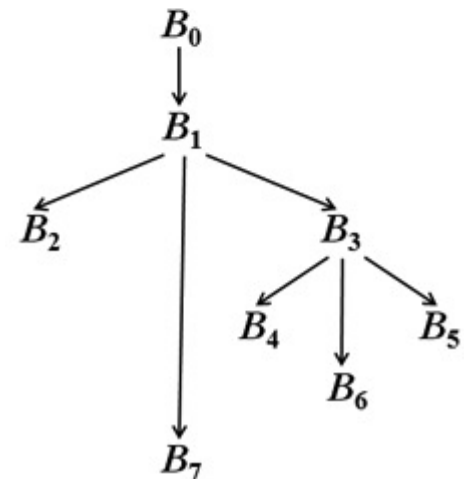
Состояние счетчиков и стеков в момент, когда *Rename*(B_0) уже кончила обрабатывать блок B_0 , но еще не удалила имена, связанные с B_0 из соответствующих стеков

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

Граф потока управления



Дерево доминаторов



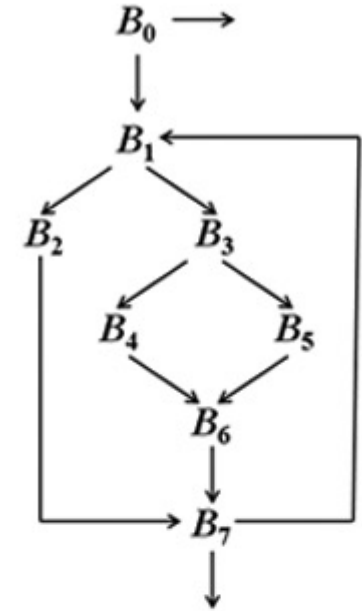
6.3 Построение частично усеченной SSA-формы

6.3.4. Переименование переменных

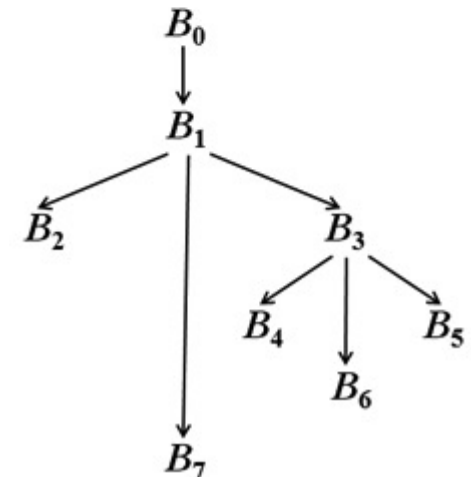
После окончания работы алгоритма получим

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		<i>SSA</i> -имена	
$a \leftarrow +, x, y$	$a \leftarrow +, x, y$	$a_0 \leftarrow +, x_0, y_0$	$a_0 \leftarrow +, x_0, y_0$
$b \leftarrow +, x, y$	$b \leftarrow a$	$b_0 \leftarrow +, x_0, y_0$	$b_0 \leftarrow a_0$
$a \leftarrow 17$	$a \leftarrow 17$	$a_1 \leftarrow 17$	$a_1 \leftarrow 17$
$c \leftarrow +, x, y$	$c \leftarrow +, x, y$	$c_0 \leftarrow +, x_0, y_0$	$c_0 \leftarrow a_0$

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 разобраться 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

B_7 $a_4 \leftarrow \phi(a_2, a_3)$
 $b_4 \leftarrow \phi(b_2, b_3)$
 $c_6 \leftarrow \phi(c_3, c_5)$
 $d_6 \leftarrow \phi(d_2, d_5)$
 $y \leftarrow +, a_4, b_4$
 $z \leftarrow +, c_6, d_6$
 $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$

B_6 $c_5 \leftarrow \phi(c_2, c_4)$
 $d_5 \leftarrow \phi(d_4, d_3)$
 $b_3 \leftarrow$

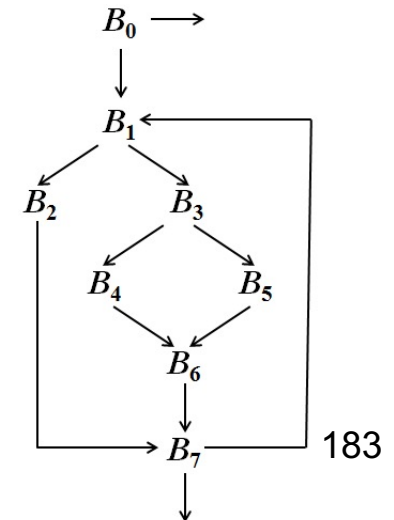
B_2 $b_2 \leftarrow$
 $c_3 \leftarrow$
 $d_2 \leftarrow$

B_7 $y \leftarrow +, a_4, b_4$
 $z \leftarrow +, c_6, d_6$
 $i_2 \leftarrow +, i_1, 1$

B_6 $b_3 \leftarrow$
 $a_4 \leftarrow a_2$
 $b_4 \leftarrow b_2$
 $c_6 \leftarrow c_3$
 $d_6 \leftarrow d_2$

B_2 $b_2 \leftarrow$
 $c_3 \leftarrow$
 $d_2 \leftarrow$
 $a_4 \leftarrow a_3$
 $b_4 \leftarrow b_3$
 $c_6 \leftarrow c_5$
 $d_6 \leftarrow d_5$

- ◇ Удаление ϕ -функций из блока B_6 породит инструкции копирования в блоках B_4 и B_8 .
- ◇ 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

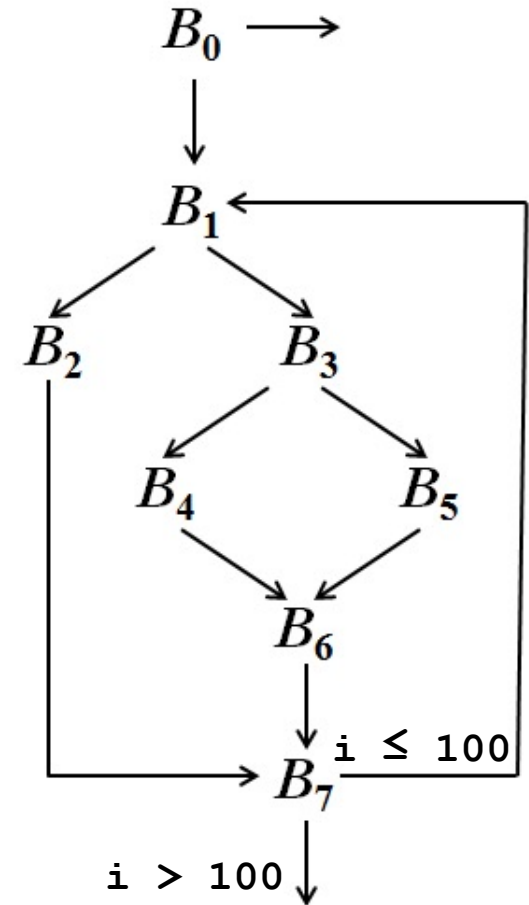
6.4.2. Замена ϕ -функций группами инструкций копирования

- ◇ 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.



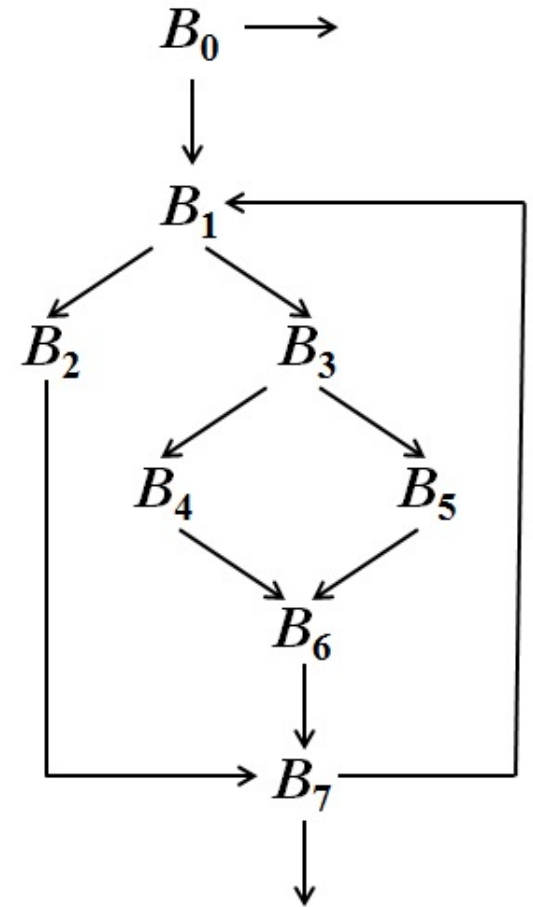
6.4 Восстановление кода из SSA-формы

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.



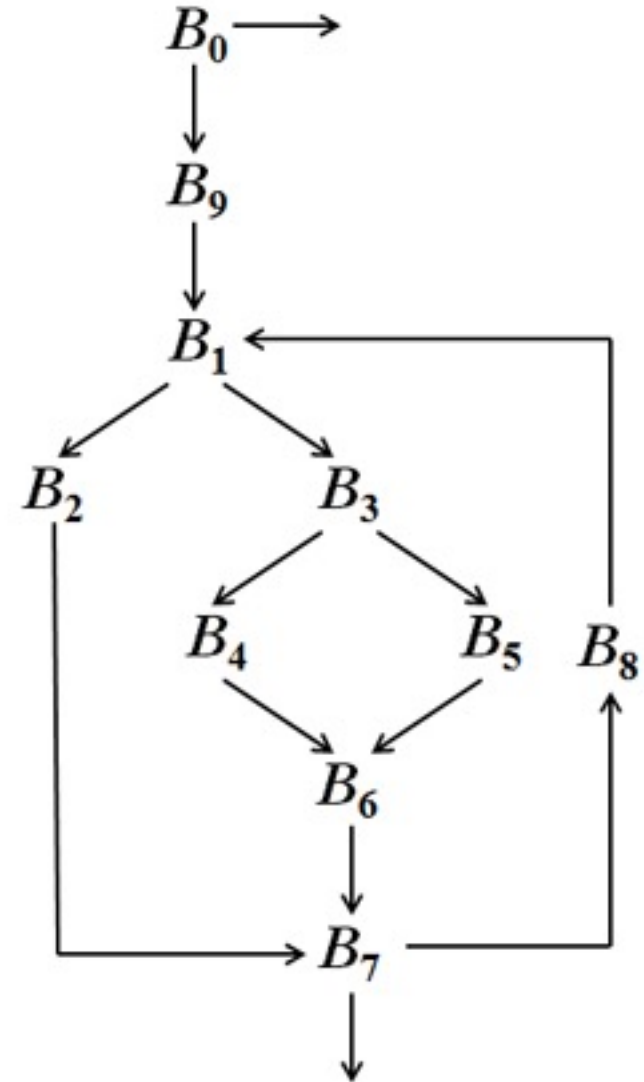
6.4 Восстановление кода из SSA-формы

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

