

# Описание и преобразование управляющих процессов.

Сети Петри и их  
модификация.

Основная задача начального этапа проектирования УА – выбор формализованного языка.

Основные понятия – базис сетей Петри:

1. событие;
2. условие.

Сеть Петри – структура УП

↓  
это последовательность процедур

Условия → событие

Состояние системы – это множество условий

Событие → новые условия →  
→ изменение состояния системы

События – множество переходов

$$T = \{t_0, t_1, \dots, t_r\}$$

Условия – множество позиций

$$A = \{a_0, a_1, \dots, a_f\}$$

I – входная функция  
O – выходная функция

}  
связь T и A

I – отображает  $t_v (v=0 \dots r)$  в мн-во позиций  $I(t_v)$  – **входные позиции перехода**

O – отображает  $t_v$  в мн-во позиций  $O(t_v)$  – **выходные позиции перехода**

$a_\mu$  - входная позиция  $t_v$ , если  $a_\mu \in I(t_v)$

$a_\mu$  - выходная позиция  $t_v$ , если  $a_\mu \in O(t_v)$

Сеть Петри –  $N = (A, T, I, O)$

## Пример:

$$A = \{a_0, a_1, a_2, a_3, a_4\}$$

$$T = \{t_0, t_1, t_2, t_3, t_4\}$$

$$I(t_0) = a_0 \quad I(t_1) = a_1$$

$$I(t_2) = a_2 \quad I(t_3) = a_3$$

$$I(t_4) = a_4$$

$$O(t_0) = a_1 \quad O(t_1) = a_2$$

$$O(t_2) = a_3 \quad O(t_3) = a_4$$

I – матрица следования

O – матрица предшествования

## Графическое представление сети Петри

### Типы вершин:

1. позиции – «O»
2. переходы – «|»

if ( $a_\mu$  - вход для  $t_\nu$ ), then (дуга  $a_\mu \rightarrow t_\nu$ )  
if ( $a_\mu$  - выход для  $t_\nu$ ), then (дуга  $t_\nu \rightarrow a_\mu$ )



$G = (V, W)$  – ориентированный  
двудольный мультиграф, где

V – множество вершин

W – множество направленных дуг

$$V = A \cup T \quad A \cap T = \emptyset$$

позиция – условие



Выполнение условия – маркировка  
позиции

(метка – «точка» в позиции)



Если несколько точек –

то «емкость условия»

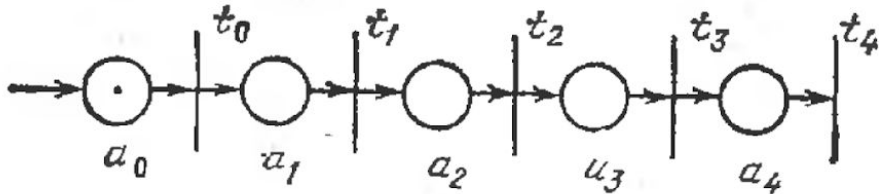
## f-вектор маркировки сети Петри.

$N = (A, T, I, O, M_0)$ , где

$M_0$  – вектор начальной маркировки

### Пример:

$M_0 = (1, 0, 0, 0, 0)$



распределение меток в позициях



порядок выполнения сети

↑ - *зависит от*

последовательности реализации  
переходов

---

переход реализуется если он активен,

т.е.

число меток во вх. позиц. => числу дуг,  
соединяющих ее с эти переходом

## Разрешающие метки

реализация активного перехода



замена маркировки сети

**M**

на

**M'** (непосредственно достижимая из M)

### Достоинства языка сети Петри:

1. позволяет описывать параллельные процессы;
2. имеет средства для задания конфликтных состояний.

q

$\omega > q$

Выполнение сети → связанные последовательности:

1. реализуемых переходов
2. маркировок  $M_0, M_1, M_2, \dots$



## Безопасная сеть Петри.

1. запрещено наличие кратных дуг между позициями и переходами;
2. вектор маркировки может содержать лишь 0 и 1;
3. реализация активного перехода возможна, если ни 1 из его выходных позиций не содержит меток – число меток в любой позиции не больше 1;
4. конечное число состояний –  $2^f$  при  $f$  позициях.

## Ограниченная сеть Петри.

$k \rightarrow k$ -безопасная позиция или  $k$ -ограниченная

$k' \geq k$  –  $k'$ -безопасной

$k_{\max}$

Ограничение оригинальной сети Петри – моделирование примитивных событий.

---

это сеть позиция-переход



автоматная сеть



маркированный граф

---

сети с предикатами на переходах



расширение ее описательных возможностей

---

Введение позиции времени в сети Петри.

1. Временные сети: переход –  $t$ ;
2. Тайм-аутные сети: переход –  $a$  и  $b$ .

## Тайм-аутные сети Петри.

$$0 \leq a \leq b$$

$q$

$(q+a)$              $(q+b)$

## Помеченные сети Петри.

метка – цвет

1 позиция – несколько цветов

## Численные сети Петри.

1. метки любой природы и величины;
2. условия активизация и результата реализации независимы;
3. при реализации переходов изменяется маркировка входных и выходных позиций и содержимое памяти данных

## Использование дуг разных типов в сети Петри.

Существуют:

### 1. Простые дуги:

- 1.1. активизирующая;
- 1.2. сдерживающая;
- 1.3. входная;
- 1.4. выходная;

### 2. Составные дуги:

- 2.1. активизирующая входная;
- 2.2. сдерживающая выходная.

**Управляющие процессы и их  
формализованное описание.**

**Простейший линейный последовательный процесс – оригинальная сеть Петри.**

$A_i$  – процедуры ( $i = 0 - k$ )  
 операторные функциональные блоки – ОФБ

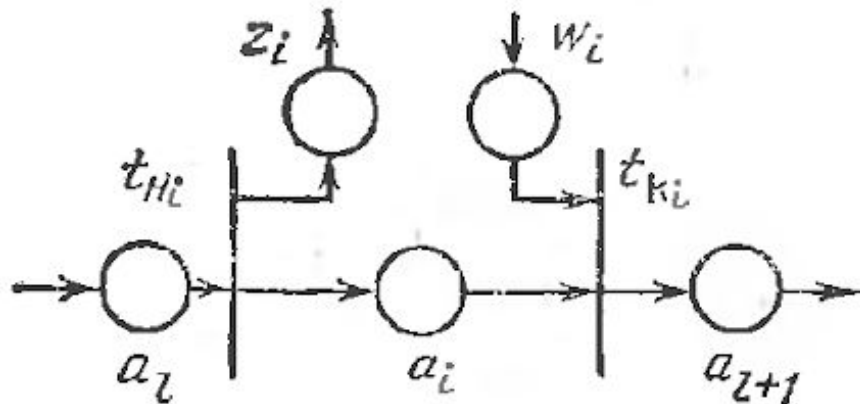
Процедура – переход сети Петри –  $t_i$  ( $i = 0 - k$ )

$a_j$  ( $j = 0 - f$ ) – позиции

**Фазы выполнения процедуры:**

1. начало;
2. выполнение;
3. окончание.

**Подсеть Петри для процедуры  $A_i$ :**



где:

$t_{Hi}$  и  $t_{Ki}$  – переходы

$z_i$  и  $w_i$  – внешние позиции

$t_{Hi}$  – начало процедуры  $A_i$

метки в  $z_i$  – включение ОФБ <sub>$i$</sub>

метки в  $a_i$  – выполнение  $A_i$

метки в  $w_i$  – окончание ОФБ <sub>$i$</sub>

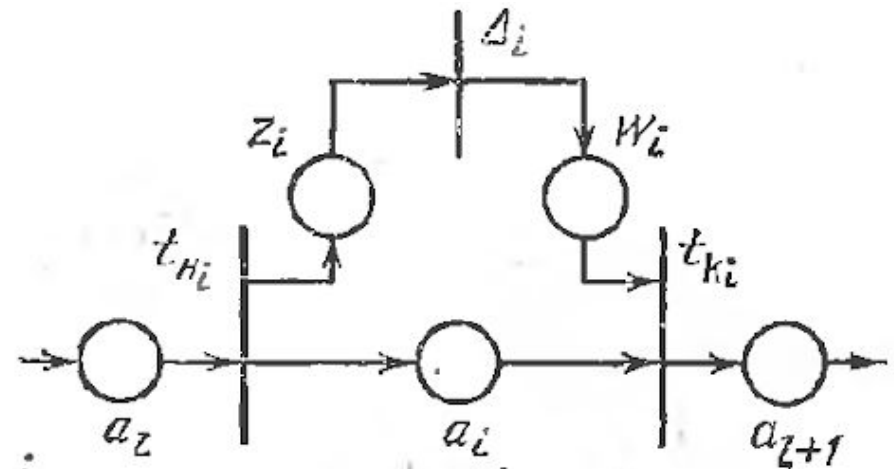


срабатывание перехода  $t_{Ki}$



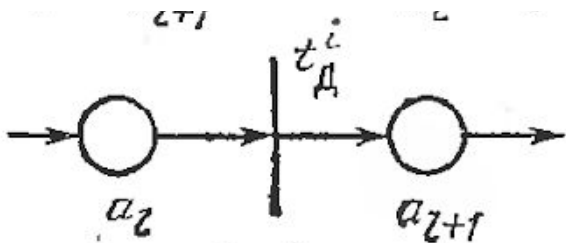
метки в  $a_{i+1}$  – завершение  $A_i$

$\Delta_i$  – непримитивный переход этой же сети Петри



Если выполнение процедуры – неделимое событие, то:

фрагмент с  $t_{Hi}$ ,  $t_{Ki}$ ,  $\Delta_i$  и  $z_i$ ,  $a_i, \omega_i$  – на  $t_d^i$



Это длительный переход.

У него есть время выполнения.

Функциональные ресурсы (ФР)

Собственный ФР

Разделяемый ФР

Пример:

$C_i$  ( $i = 0 - l$ ) – разделяемые ресурсы

$q$  – число экземпляров  $i$ -го ФР



$q$  – кратность ресурса  $C_i - C_i^q$



его могут использовать  $\alpha \leq q$  процедур

при  $q=1$  - у ресурса 2 состояния  $q+1$

внутренние или собственные ресурсы

Процедуры  $A_i$  линейного процесса:

1.  $\{C_B^i\}$  – множество ФР – уже владеет;
2.  $\{C_3^i\}$  – множество ФР – запрашивает;
3.  $\{C_0^i\}$  – множество ФР – освобождает.

Процесс из 5-и последовательно выполняемых процедур  $A_i$  при следующем распределении 3-х ФР  $C_j$ :

$A_1(\{C_2\}, \{-\}, \{-\})$ ;

$A_2(\{C_2\}, \{C_1\}, \{C_2\})$ ;

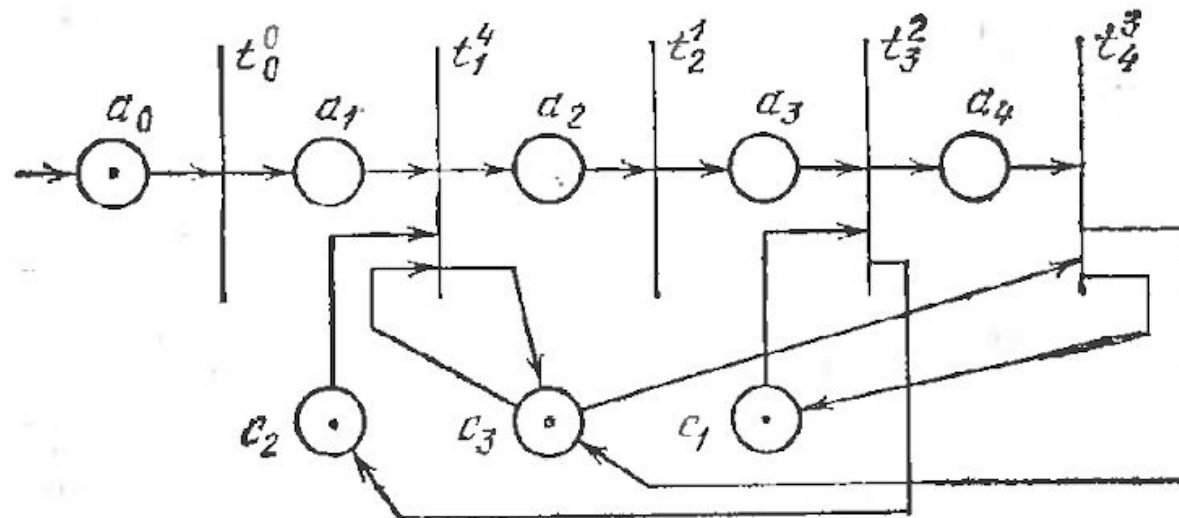
$A_3(\{C_1\}, \{C_3\}, \{C_1, C_3\})$ ;

$A_4(\{-\}, \{C_2, C_3\}, \{C_3\})$ .

$C_j$  – ресурсные внутренние позиции

$T_d^i$  – длительные переходы

$a_\mu$  – основные внутренние позиции



## Пример:

Если для  $A_i - \{C_B^i\} = C_1, \{C_3^i\} = C_3, C_4$  и  $\{C_O^i\} = C_1, C_4,$

то  $A_i(\{C_1\}, \{C_3, C_4\}, \{C_1, C_4\})$

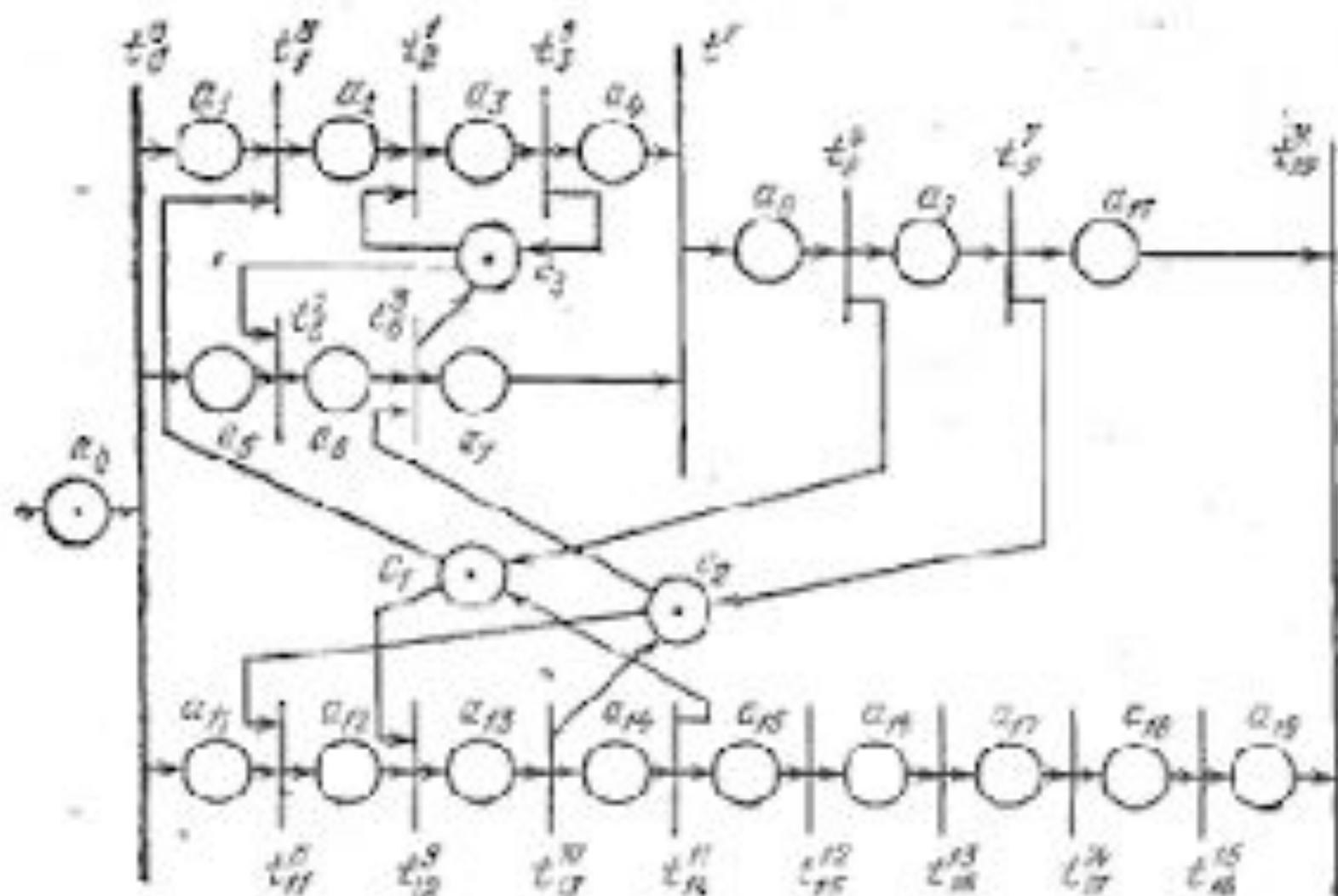
$\{C_3^i\} \cap \{C_B^i\} = \emptyset$

Иногда:  $\{C_B^i\} = \emptyset$  и  $\{C_3^i\} = \{C_O^i\}$

## Особенности описания параллельного линейного процесса в сети Петри.

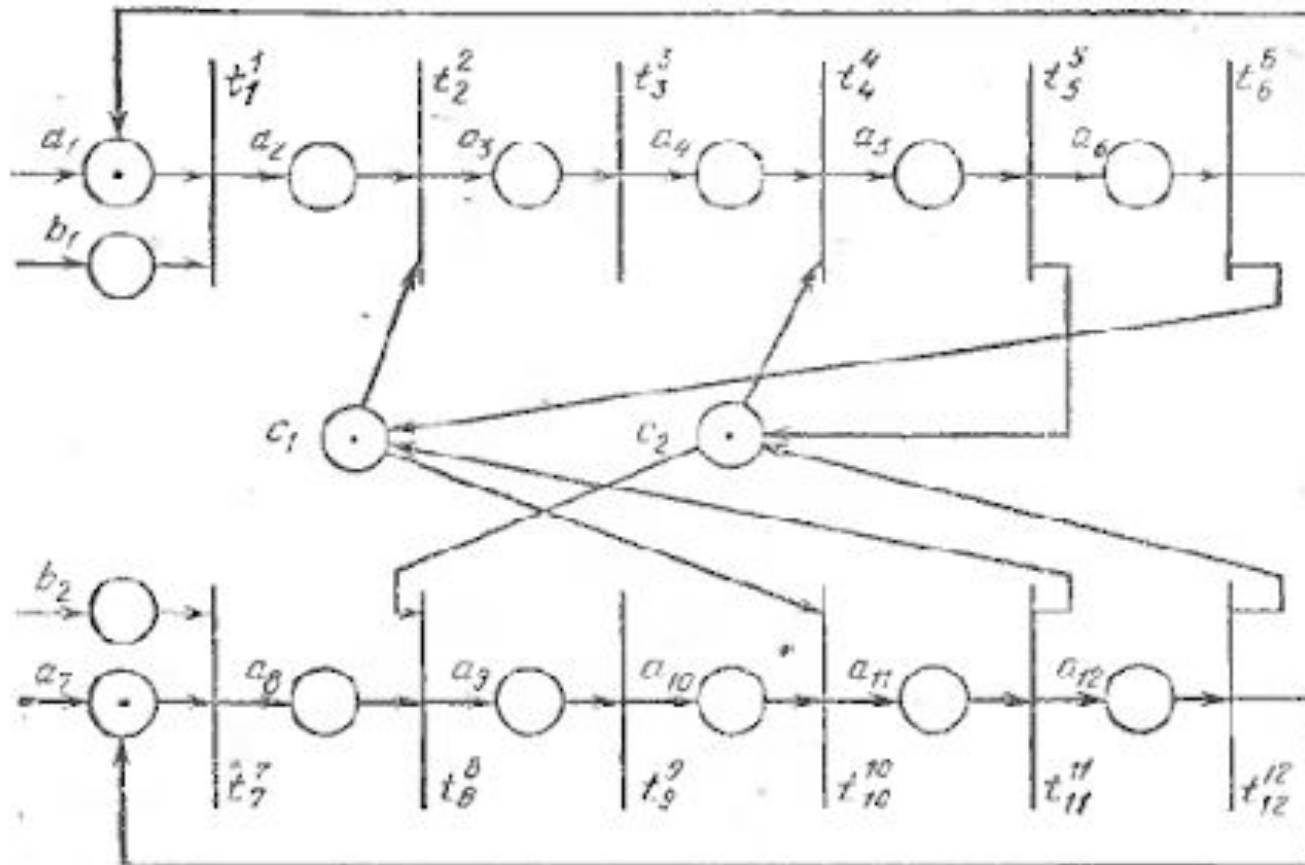
1. длительные переходы – процедуры;
2.  $t_R$  – переходы распараллеливания;
3.  $t_S$  – переходы соединения;
4. наличие элементарных подпроцессов;
5. собственные ФР подпроцесса

## Пример:



$A_1(\{C_1\}, \{C_3\}, \{-\})$ ;  $A_2(\{-\}, \{C_0\}, \{-\})$ ;  $A_3(\{C_3\}, \{C_2\}, \{C_1\})$ ;  
 $A_4(\{C_1, C_3\}, \{-\}, \{C_1\})$ ;  $A_5(\{-\}, \{C_1\}, \{-\})$ ;  $A_6(\{C_1, C_3\},$   
 $\{-\}, \{C_3\})$ ;  $A_7(\{C_2\}, \{-\}, \{C_2\})$ ;  $A_8(\{-\}, \{C_3\}, \{-\})$ ;  $A_9(\{C_2\},$   
 $\{C_1\}, \{-\})$ ;  $A_{10}(\{C_1, C_3\}, \{-\}, \{C_2\})$ ;  $A_{11}(\{C_1\}, \{-\}, \{C_1\})$ .

## Пример:



## Особенности описания разветвленного процесса в сети Петри.

1. позиции альтернативного разветвления;
2. позиции альтернативного соединения;
3. набор значений логических условий в конфликтных переходах альтернативного разветвления;



## Логические ресурсы системы – ЛР.

$D_i$  ( $i = 1 - m$ ) – ЛР

в ЛР  $D_s$  проверяется  $p_s$  – условие

### Внутренние ЛР

$A_i$  ( $\{P_1^i\}, \{P_2^i\}$ )

Пример:

$A_i$  ( $\{p_1, p_2\}, \{p_2, p_3\}$ )

$p_s - \{P_2^i\}$  – изменяется  $A_i \rightarrow D_s$  – занято

$p_s - \{P_1^i\}$  – не изменяется  $A_i \rightarrow D_s$  – не занято

### Описание ЛР в сети Петри.

$d_s$  – наличие метки – нет монополии

$D_s$   $d_s^1$  – наличие метки –  $p_s = 1$

$d_s^0$  – наличие метки –  $p_s = 0$

### Пример 1:

$A_i$  зависит от ЛУ ( $p_s \in D_s$ )

и изменяет его ( $p_s$ )

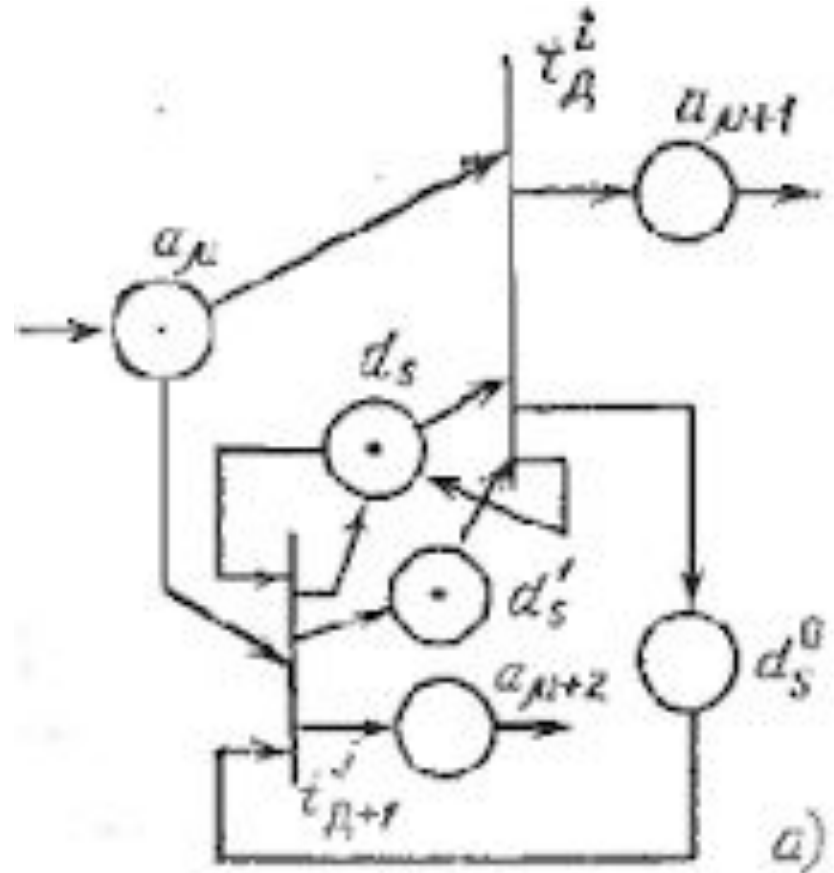
$A_i$  ( $\{p_s\}, \{p_s\}$ ) и  $A_j$  ( $\{p_s\}, \{p_s\}$ )

входные позиции для  $t_D^i$  ( $t_D^j$ ):

$a_\mu, d_s$  и  $d_s^1$  ( $d_s$  и  $d_s^0$ )

выходные позиции для  $t_D^i$  ( $t_D^j$ ):

$a_{\mu+1}$  ( $a_{\mu+2}$ ),  $d_s$  и  $d_s^0$  ( $d_s$  и  $d_s^1$ )



### Пример 2:

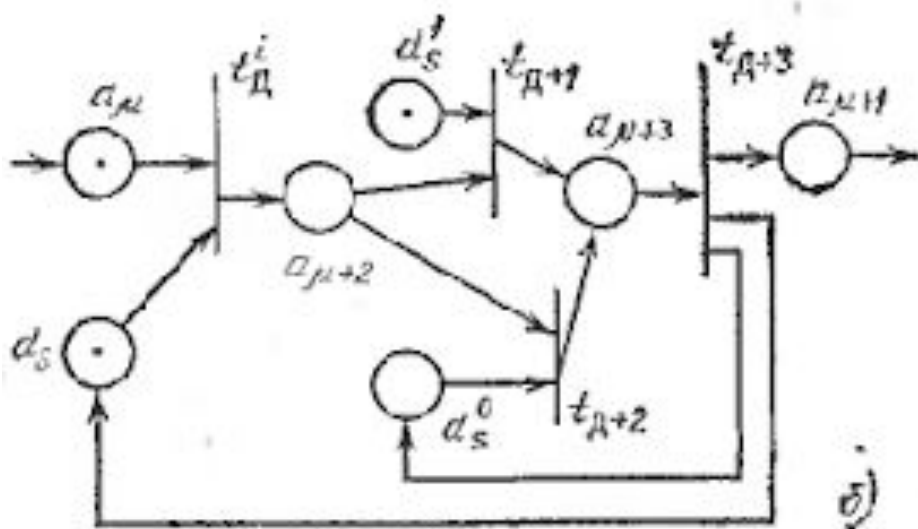
$A_i$  не зависит от  $p_s$ , но меняет его.

входные позиции  $t_d^i$ :

$a_\mu, d_s$

Т.к.  $p_s$  не проверяется в начале, то:

1. удаляется метка из  $d_s^0$  (или  $d_s^1$ )
2. помещается метка в  $d_s^0$  (или  $d_s^1$ )  
если после  $A_i$   $p_s = 0$  (или 1)



### Пример 3:

$A_i$  зависит от  $p_s$ , но не меняет его.



новый тип дуг – **неизменяющиеся**.

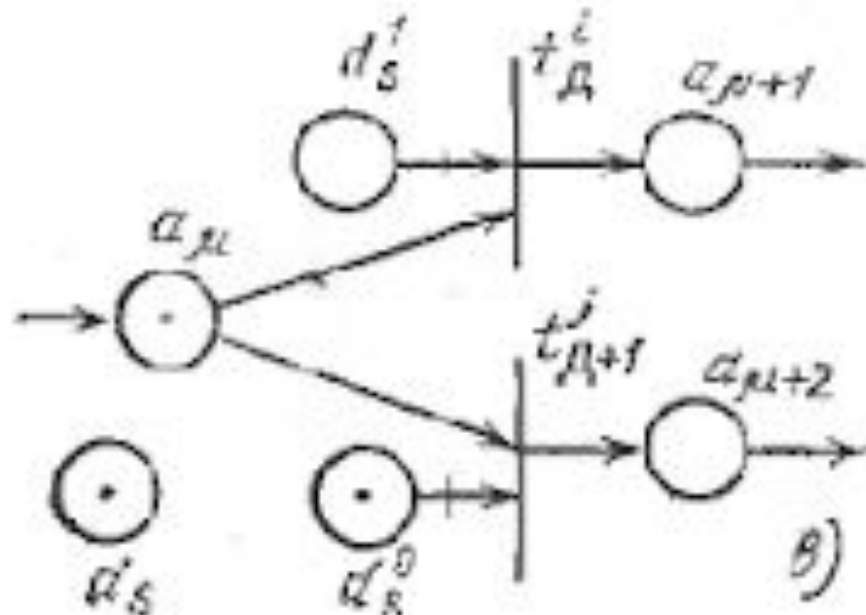
$t_v$  с  $a_\mu$  неизменяющейся дугой, то

в  $a_\mu$  должна быть метка, но она **не удаляется**

Если  $A_i (\{p_s\}, \{-\})$ , то  $d_s^1$  с  $t_d^i$   
неизменяющейся дугой

Если  $A_i (\{p_s\}, \{-\})$ , то  $d_s^0$  с  $t_d^j$   
неизменяющейся дугой

$d_s$  не используется



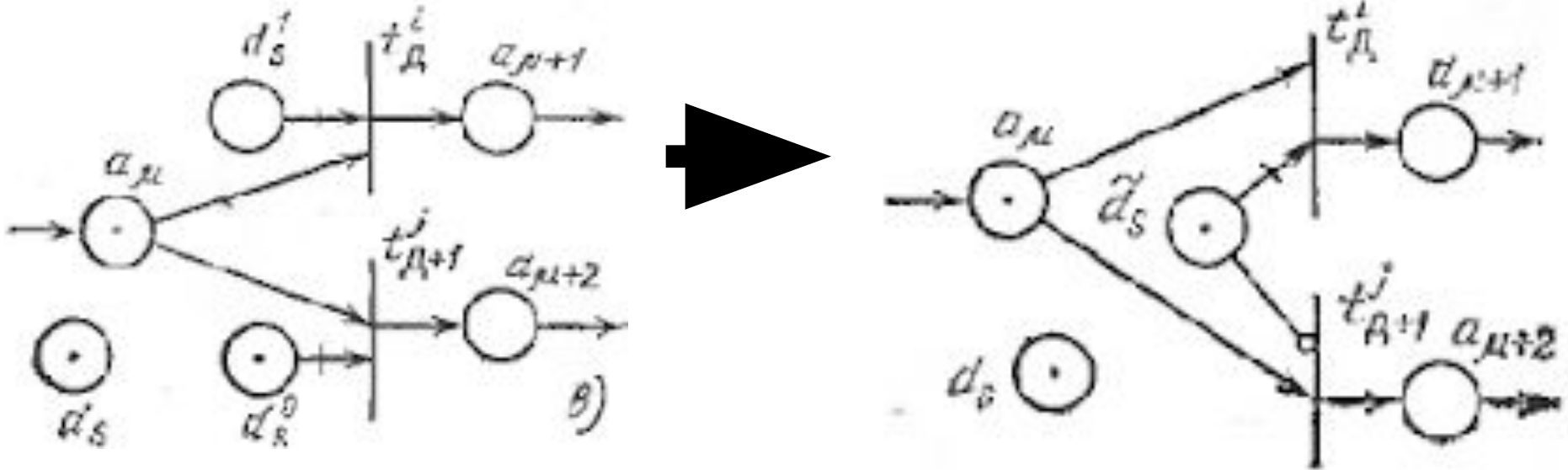
Введение сдерживающих  
(тормозящих) дуг.

Если  $t_v$  с  $a_\mu$  - тормозящей дугой, то:

1.  $a_\mu$  не должна содержать метки
2.  $D_s$  2-мя позициями:
  - а)  $d_s$
  - б)  $\tilde{d}_s$  – содержит метку, если  $p_s=1$

**Пример 4:**

$A_i (\{p_s\}, \{-\})$  из примера 3.



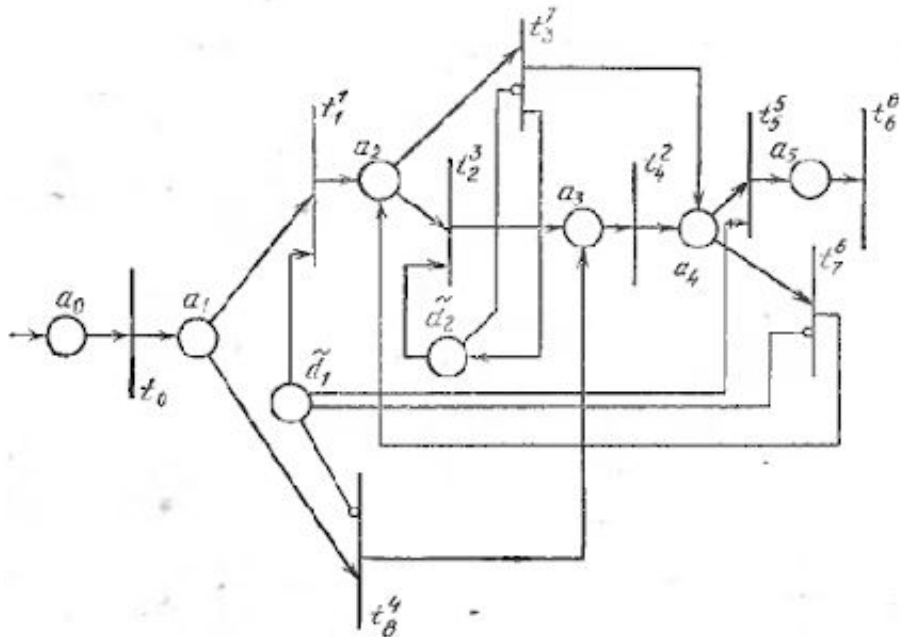
### Пример 5:

Разветвленный последовательный процесс:

1. Все  $A_i$  используют собственные ФР
2.  $A_1, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7$  – зависят от  $p_1$  и  $p_2$
3.  $A_1, A_3, A_7$  – меняют  $p_j$

$A_1(\{p_1\},\{p_1\}); A_3(\{p_2\},\{p_2\}); A_4(\{p_1\},\{-\});$

$A_5(\{p_1\},\{-\}); A_6(\{p_1\},\{-\}); A_7(\{p_2\},\{p_2\})$



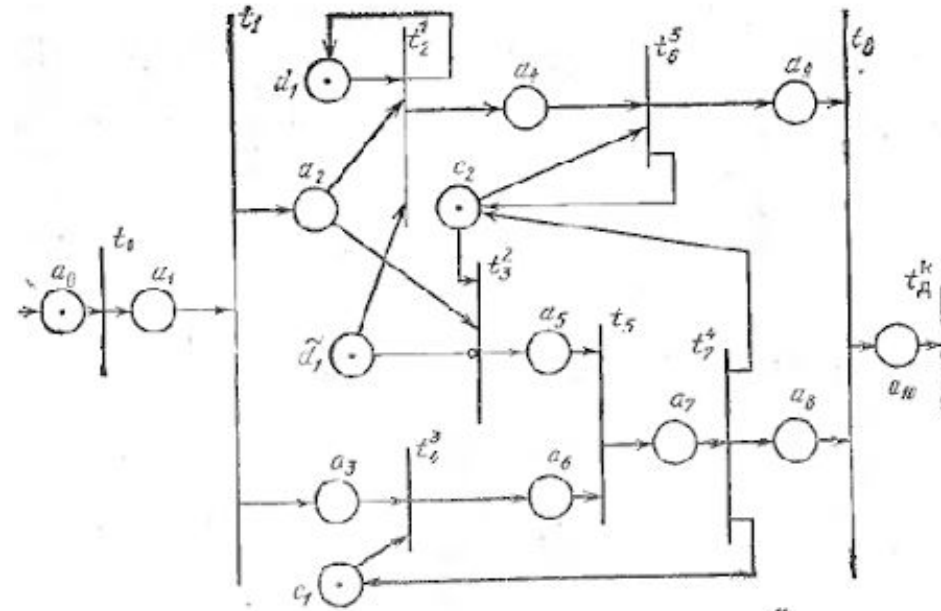
### Пример 6:

УП с

альтернативными

и

параллельными участками.



**Обобщенная сеть Петри для описания**  
**неавтономного управляющего**  
**процесса.**

## Автономный УП

## Неавтономный УП

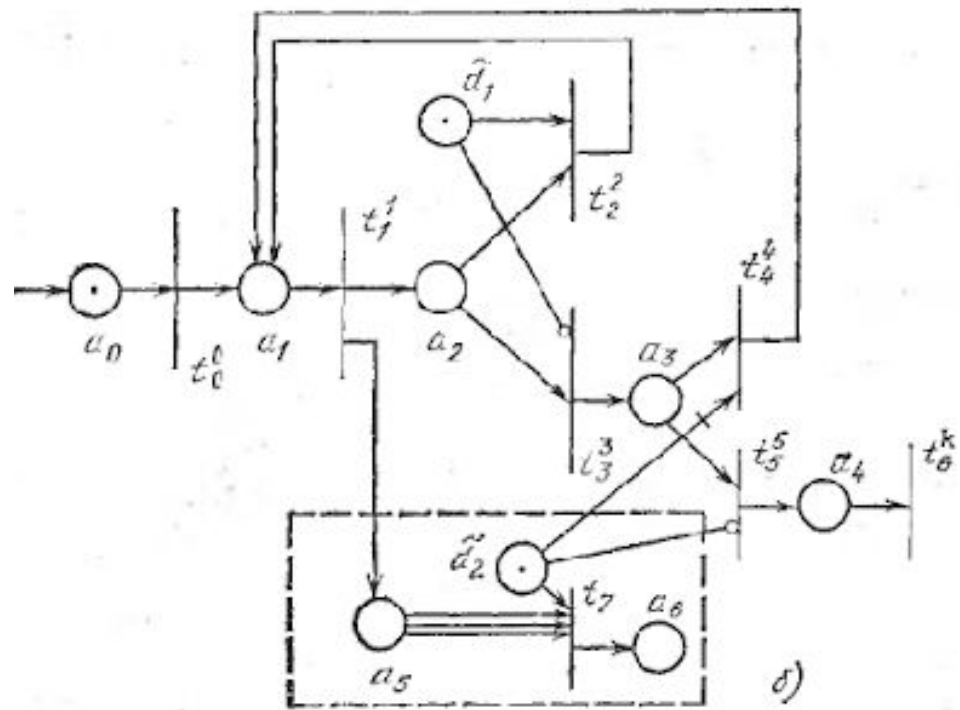
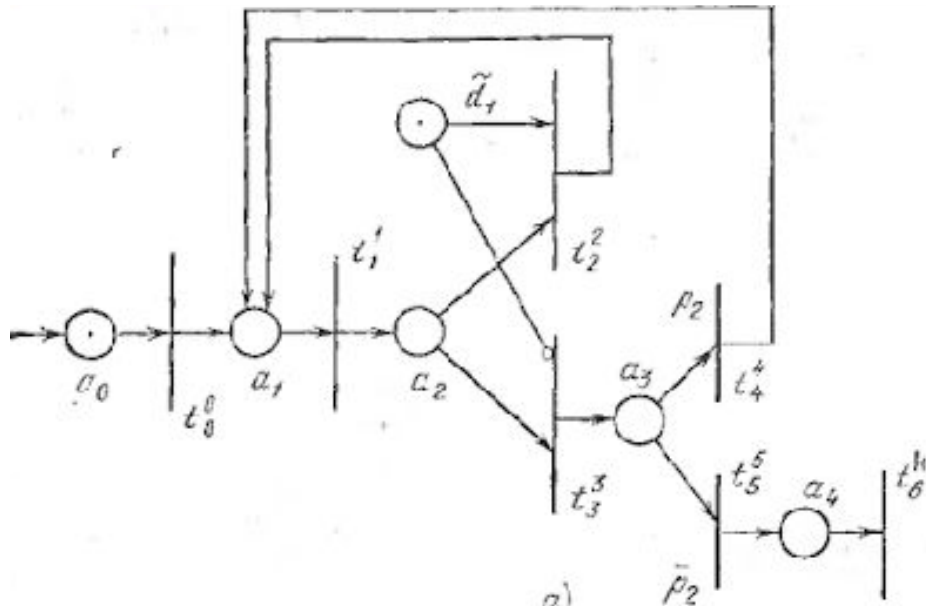
### Описание неавтономного процесса:

1. внеш. ЛУ ( $p_u$ )  $\leftrightarrow$  внеш. позиция  $h_u$  – метка есть, если  $p_u=1$ ; нет при  $p_u=0$
2. внеш. ЛУ  $\in \{P_1\}$
3. есть внутренние и внешние ЛУ
4. если  $A_i$  выполняется при  $p_u=1$  (0), то  $h_u$  соединяется с  $t_d^i$  сдерживающей дугой
5. не включается позиция состояния внешнего ЛУ
6. развитие процесса – зависит от начальной маркировки внутренних позиций и текущей маркировки внешних входных позиций
7. замена внешних входных позиций на предикаты, зависящие от внешних ЛУ

## Если не определено влияние $A_i$ на значение $p_s$ :

1. возможное изменение  $p_s$  – это безразличное значение ( $\tilde{p}_s$ ) в  $\{P_2^i\}$
2. позиция состояния  $D_s$  - в описании параллельного процесса
3. на время выполнения  $t_d^i$  метка из  $d_s$  удаляется
4. позиция  $\tilde{d}_s$  аналогична внешней позиции

**Пример:**



ФР – собственные  
 ЛР  $D_1$  – внутренний  
 ЛР  $D_2$  – изменяется  $A_1 \rightarrow$  изменяется  $p_2$   
 Задано:  $A_2(\{p_1\}, \{\bar{p}_1\})$

$A_3(\{p_1\}, \{-\})$

$A_4(\{p_2\}, \{-\})$

$A_5(\{p_2\}, \{-\})$

ЛР  $D_2$  – счетчик  $\rightarrow$  позиция  $d_2$  - внутренняя  
 $k$  – константа для сравнения  
 $k$ -кратная дуга между  $a_5$  и  $t_7$

## Пример:

Одни и те же ресурсы запрашиваются разными параллельными подпроцессами.

### Для этого:

в  $d_s$   $n$  меток в начальной маркировке –  $n$  – максимальное число подпроцессов, немонопольно владеющих  $D_s$ .

$d_s$  – входная и выходная позиция для  $n$  переходов

дуга кратности  $n$  соединяет переход и позицию  $d_s$  при монопольном владении  $D_s$

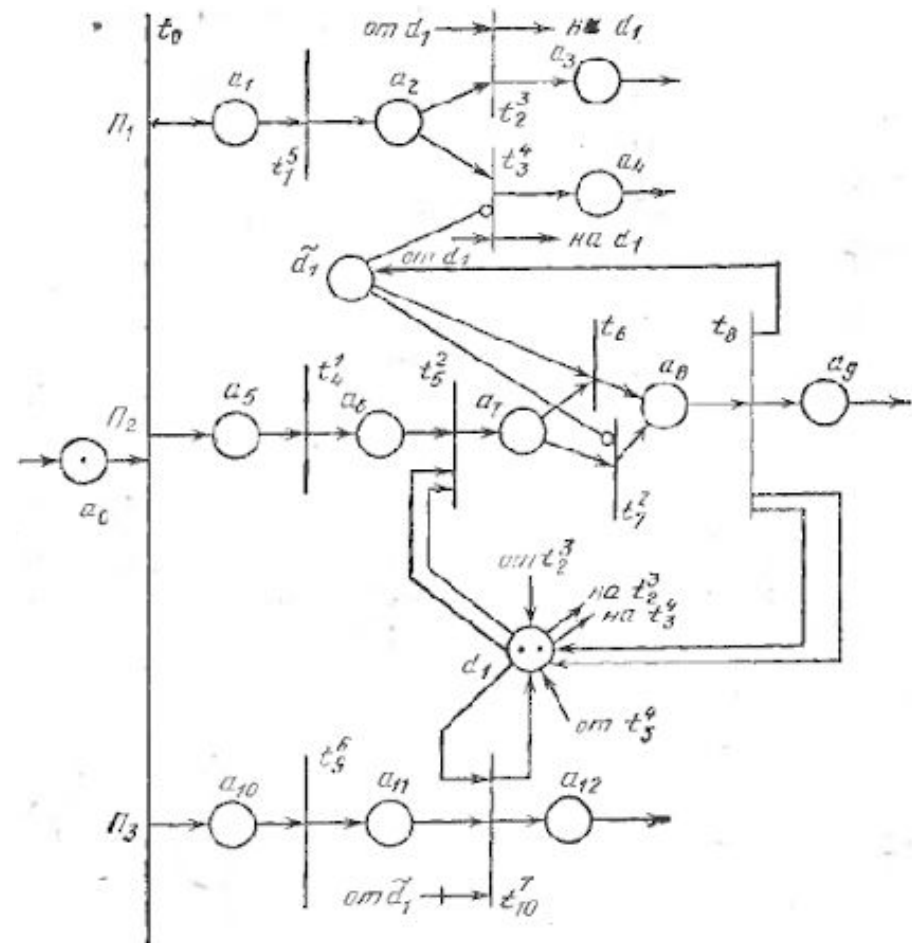
$\Pi_1$  и  $\Pi_2$  немонопольно владеют  $D_1$  при  $A_3$  или  $A_4$  и  $A_7$

$A_3(\{p_1\}, \{-\})$      $A_4(\{p_1\}, \{-\})$

$A_7(\{p_1\}, \{-\})$      $A_2(\{-\}, \{p_2\})$

взаимодействие параллельных подпроцессов – 2-е метки в  $d_1$  и 2-кратные дуги к  $t_2^5$

одновременно  $t_2^5$  и  $t_{10}^7$



$t_2^5$  – удаляет обе маркировки из  $d_1$  – монопольное использование  $D_1$   
 маркировка  $\tilde{d}_1$  не изменяется при

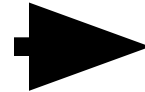


# Граф обобщенной сети Петри

## содержит:

1. длительные переходы
2. примитивные переходы
3. основные внутренние позиции
4. ресурсные внутренние позиции
5. основные дуги
6. неизменяющие дуги
7. сдерживающие дуги
8. длительный переход – это процедура
9. предикаты у  $t_d^i$ , если  $A_i$  зависит от внешних ЛУ
10. примитивные переходы – переходы распараллеливания и соединения – задание структуры процесса
11. маркировка  $a_\mu$  (основные) и  $c_j, d_s, \phi_s$  (внутренние ресурсные) – полное состояние УП
12. дуги – последовательность выполнения процедур и их взаимодействие с ФР и ЛР.

заданной  
кратности



## Свойства:

Временных сетей с переходами, помеченными предикатами и операциями, и дугами разных типов.

## Особенность:

1. в описание процесса вводятся используемые им ресурс
2. учитывается влияние процедур процесса на состояние ресурсов

**Получение правильного  
управляющего процесса.**

**Граф достижимых маркировок  
сети Петри.**

Недопустимые – тупиковые состояния.

Причины возникновения тупиковых состояний.

Методы анализа сетей Петри.

Дерево достижимых состояний сетей Петри.

$M_0$   $t_1$   $M_1$

$\omega$  – бесконечное число меток

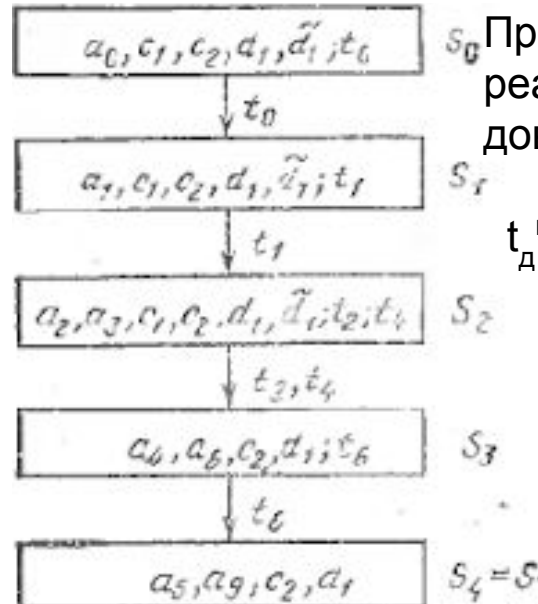
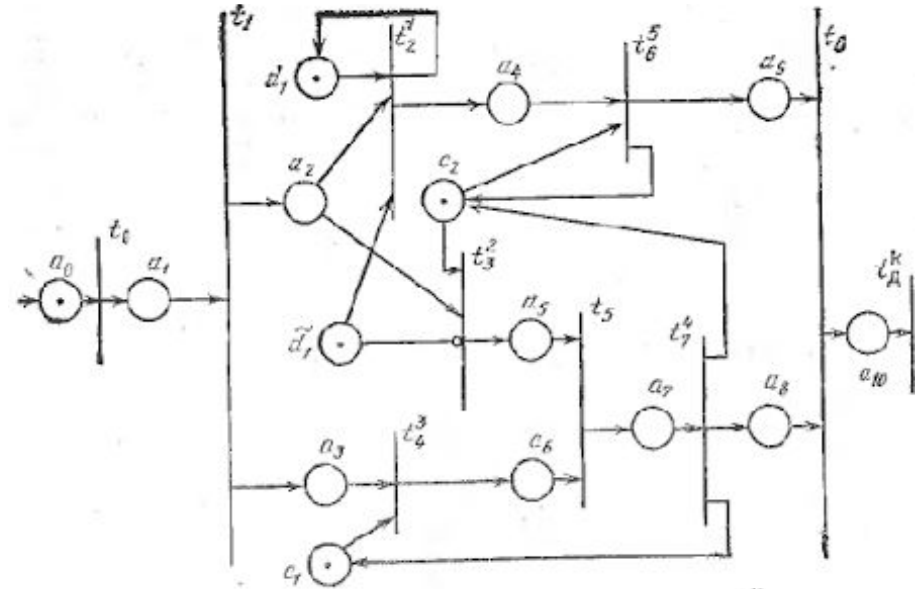
Неограниченные и ограниченные сети Петри.

Описание графа достижимых маркировок:

$G_N$   
 $M_i$   
 $a_\mu$   
 $S_i$

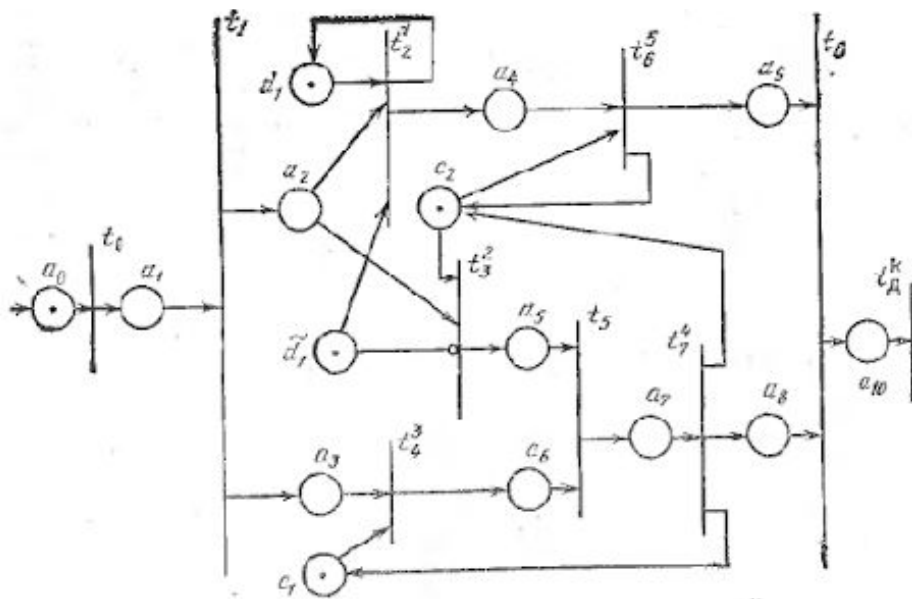
**Влияние структуры процесса на наличие тупиковых состояний.**

**Пример:**



$S_0$  Предположение – время реализации всех переходов одинаково.

$t_D^k$  при  $p=1$  в  $S_4$  - тупик

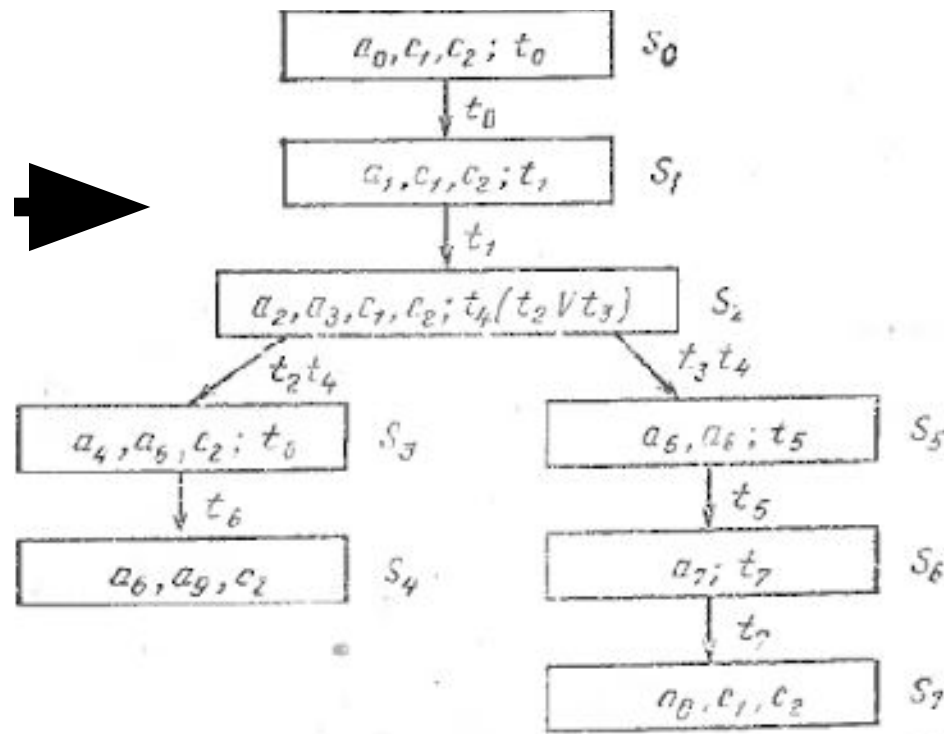
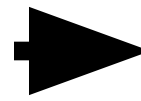


Для  $p=0$  в начальной маркировке, т. е. в  $\tilde{d}_s$  нет метки – вместо  $t_2$  будет активизирован  $t_3$ .

левая ветвь –  $p=1$

правая ветвь –  $p=0$

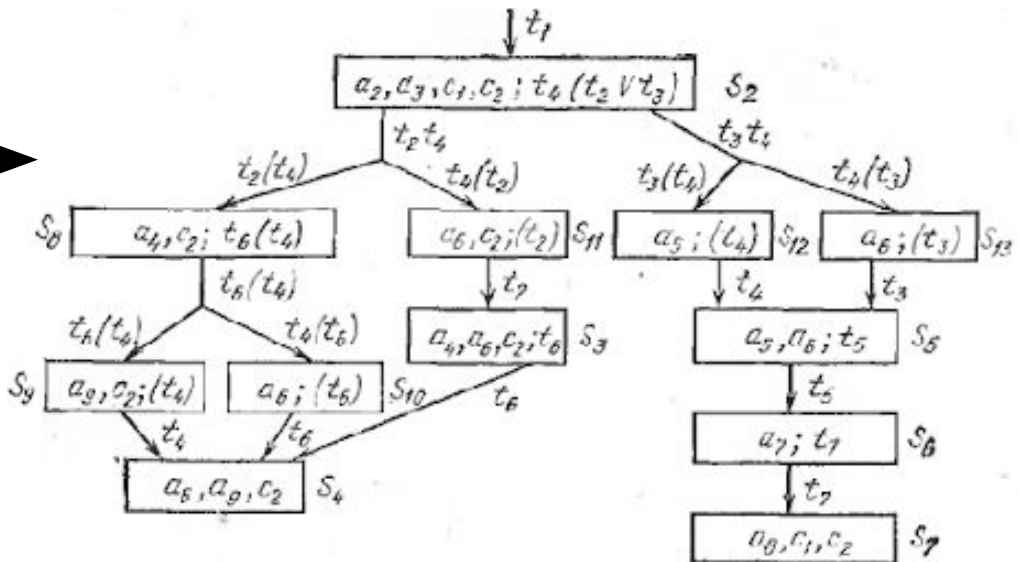
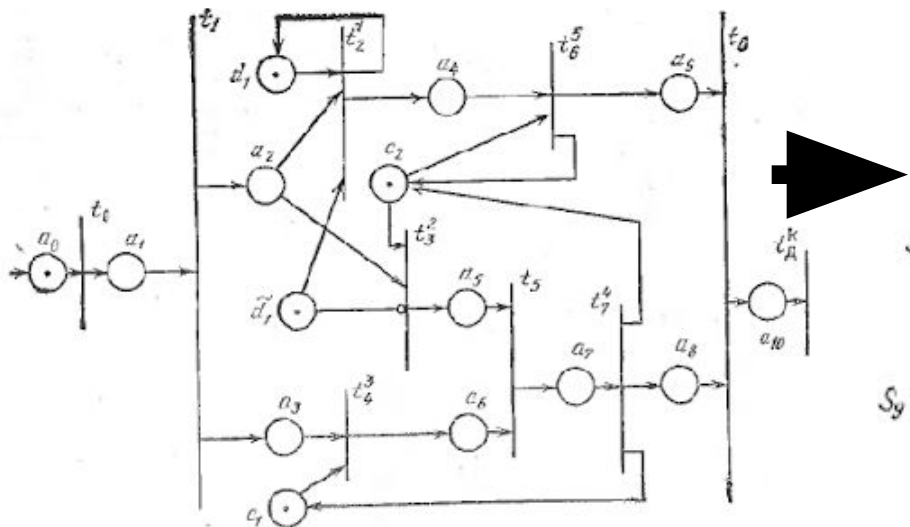
$S_4$  и  $S_7$  – тупиковые



Реализация активизированных переходов завершается одновременно.

Это граф статических состояний процесса.

# Граф, содержащий статические и промежуточные состояния.



Это динамический граф.

Исходящие дуги – переходы, переходящие в стадию реализации.

Входящие дуги – переходы, закончившие реализацию.

В скобках – переходы, продолжающие реализацию.



Неустойчивые состояния.

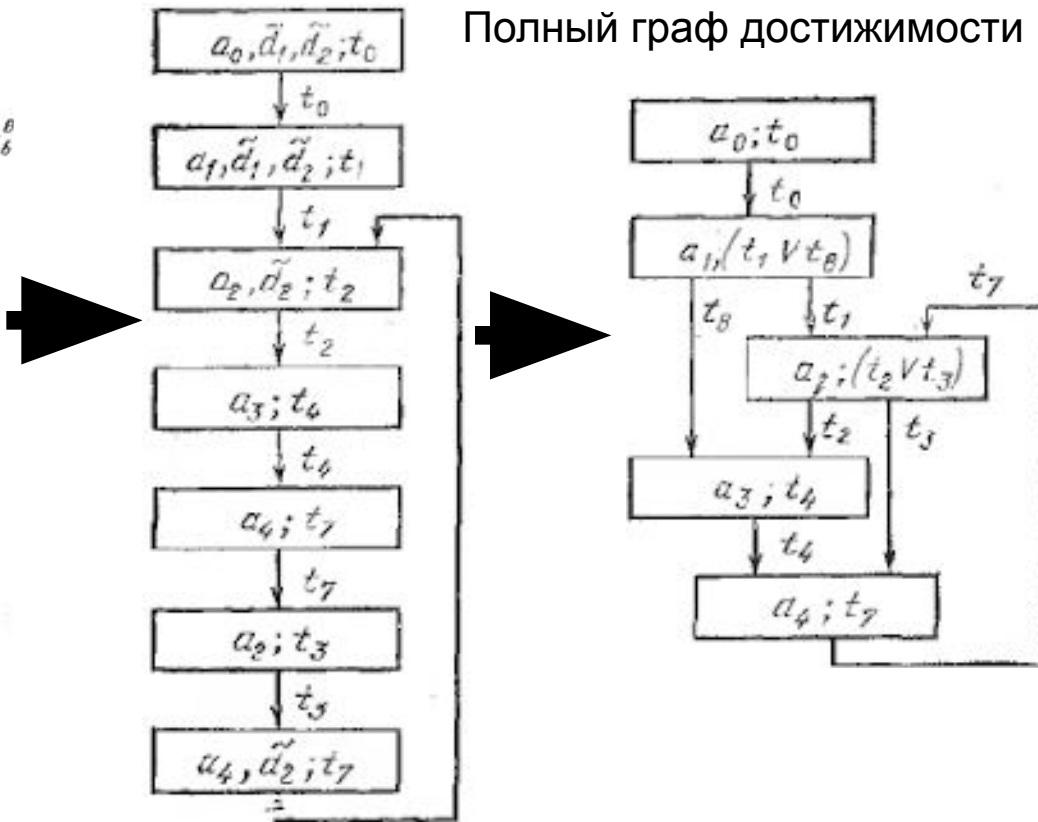
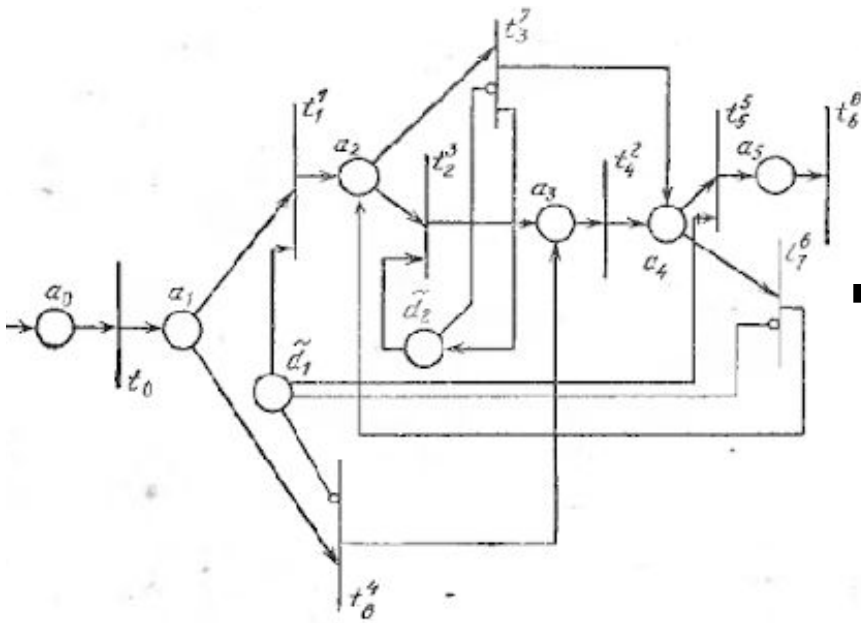
$S_8 \quad a_3 \quad a_6 \quad t_4$   
 $S_4$  и  $S_7$  – тупиковые

Причина – недопустимая структура процесса.

# Требования к правильной структуре процесса.

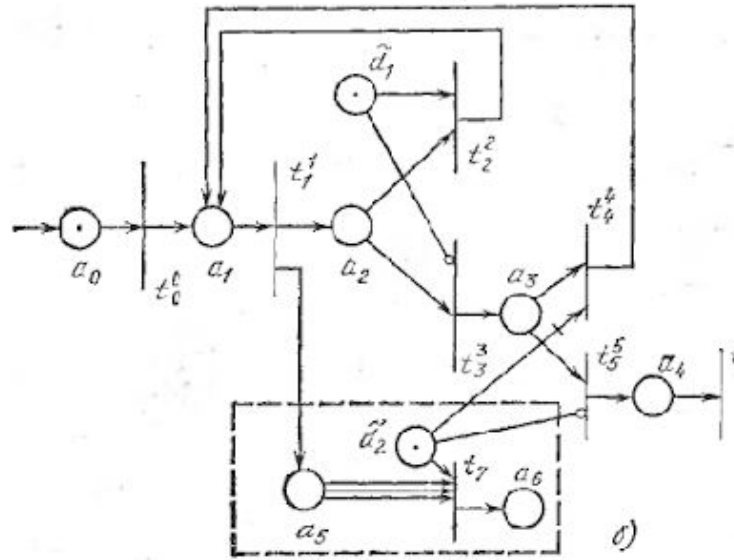
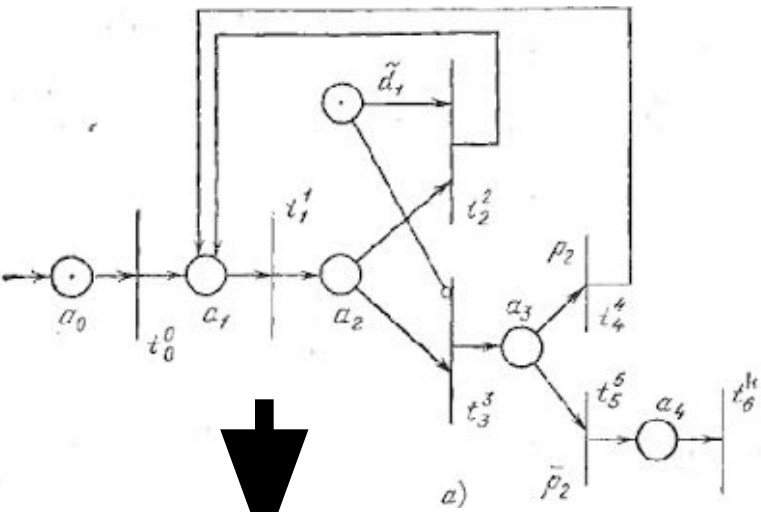
Другая причина недостижимости конечного состояния – **ЦИКЛЫ**.

Пример:



Для фиксированной начальной позиции  $d_1$  и  $d_2$ .

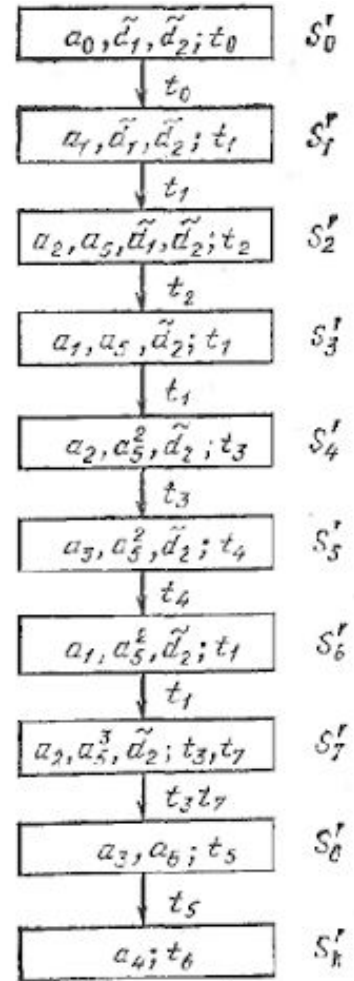
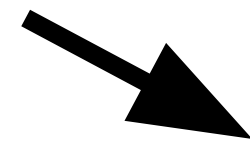
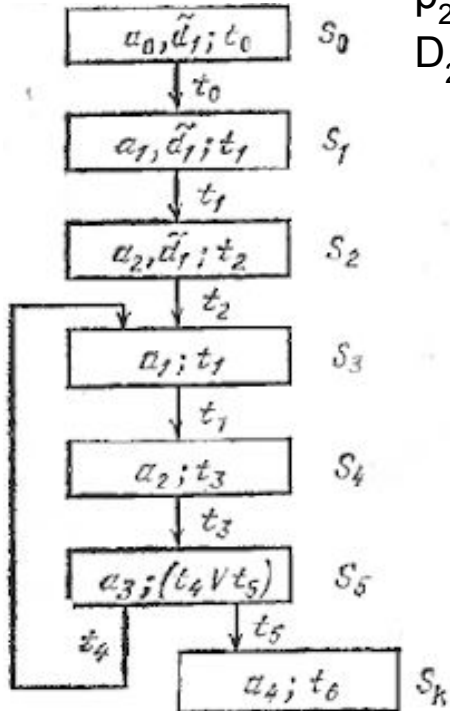
**Пример:**



Есть информация о  $D_2$  и его взаимодействии с УП



$p_2=1$   
 $D_2$  – внешний ЛР



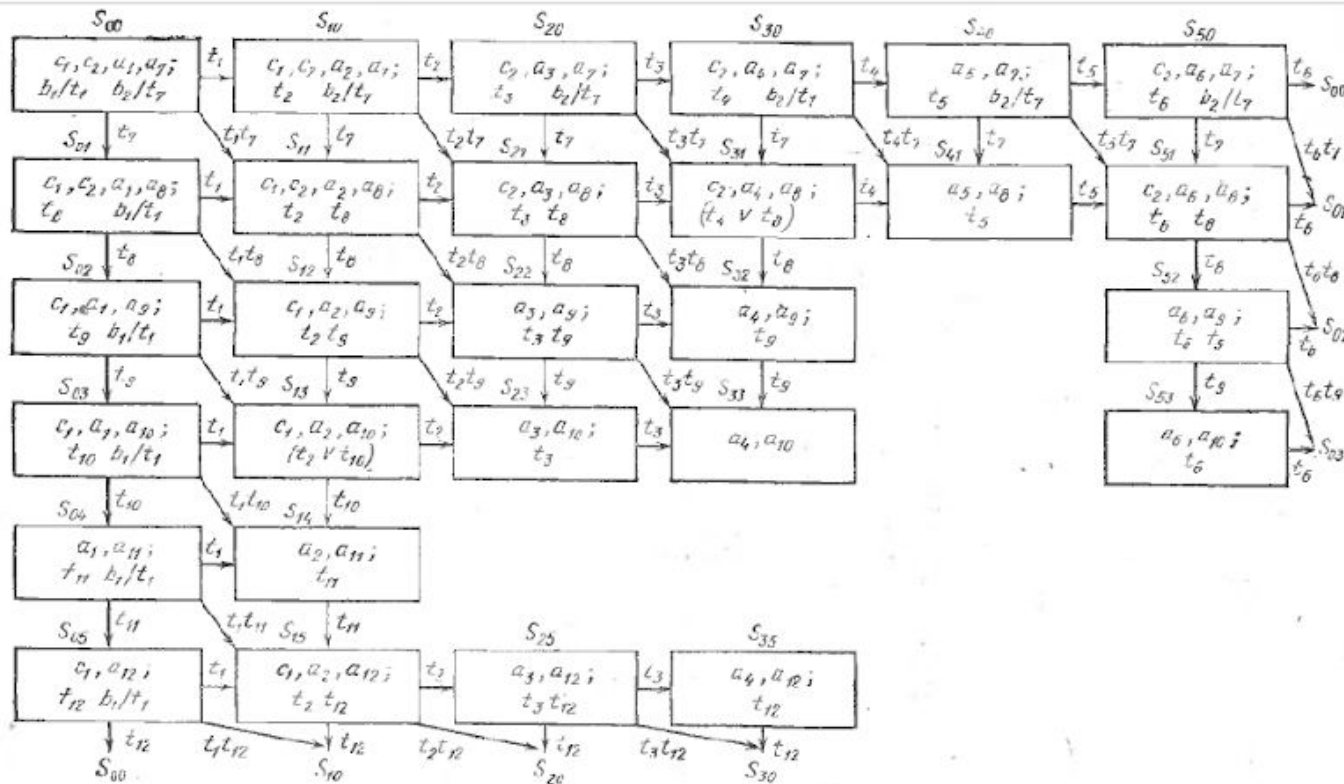
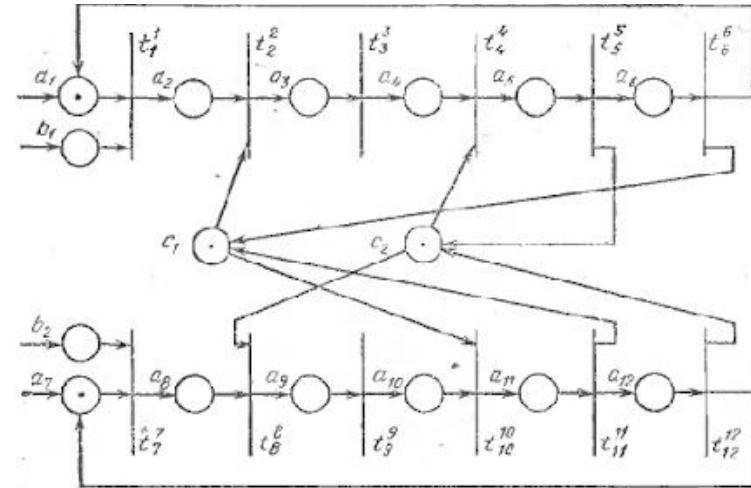
# Тупиковые состояния, вызываемые разделением функциональных ресурсов.

## Пример:

$\Pi_1$  и  $\Pi_2$  – асинхронные циклические процессы

$C_1$  и  $C_2$  – разделяемые ФР

$b_1$  и  $b_2$  – внешние входные позиции



$\Pi_1$  – по горизонтали  
 $\Pi_2$  – по вертикали  
 $S_{ij}$  – вершины, состояния, где  $i$  – номер в  $\Pi_1$ , а  $j$  – в  $\Pi_2$



# Классификация состояний в графе достижимых маркировок сети Петри.

1. Состояние блокировки –  $S_{\bar{b}}$ :

$$a_{\mu} \quad t_i$$

2. Состояние взаимной блокировки –  $S_{\text{в.б}}$

3. Состояние полной взаимной блокировки –  $S_{\text{п.в.б}}$

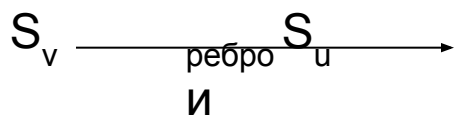
4. Тупиковое состояние –  $S_T$  –

это  $S_{\text{в.б}}$  и  $S_{\text{п.в.б}}$

5. Предтупиковое состояние –  $S_{\text{п.т}}$

$Q_3\{S_T, S_{\text{п.т}}\}$  – множество запрещенных состояний

6. Опасное состояние –  $S_{\text{оп}}$ , если:



$$S_v \in Q_3, \text{ а } S_u \notin Q_3$$

$Q_{\text{оп}}$  – множество опасных состояний

7. Безопасное состояние

8. Состояние конфликта –  $S_{\text{кн}}$

Опасные отрезки пути в графе

Корень опасных отрезков –  $S_{\text{к.оп}}$

Дополнительная блокирующая позиция –  $a_{\bar{b}}$

# Пример:

