

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Кузбасский государственный технический  
университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра информационных и автоматизированных  
производственных систем

Составители  
В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов,  
П. И. Николаев, И. С. Кузнецов

## **ВЫЯВЛЕНИЕ «УЗКИХ МЕСТ» В ТЕХНОЛОГИИ С ПОМОЩЬЮ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **Методические указания к лабораторной работе**

Рекомендовано учебно-методической комиссией направления подготовки  
15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» в  
качестве электронного издания для использования в образовательном  
процессе

Кемерово 2022

**Рецензенты:**

**Чичерин И. В.** – к.т.н., доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем

**Зиновьев Василий Валентинович**

**Стародубов Алексей Николаевич**

**Николаев Петр Игоревич**

**Кузнецов Игорь Сергеевич**

**Выявление «узких мест» в технологии с помощью имитационного моделирования:** методические указания к лабораторной работе для обучающихся направления подготовки 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств, всех форм обучения / сост. В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов, П. И. Николаев, И. С. Кузнецов; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2022. – Текст : электронный.

В данных методических указаниях разработанных по дисциплине «Моделирование систем и процессов» приведены цель и задача, общие сведения об изучаемом материале, задания для выполнения, вопросы для самопроверки. Рекомендуемая литература для самостоятельной подготовки приведена в рабочей программе дисциплины.

© Кузбасский государственный  
технический университет имени  
Т. Ф. Горбачева, 2022

© В. В. Зиновьев, А. Н. Стародубов,  
П. И. Николаев, И. С. Кузнецов,  
составление, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

1	ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ .....	4
2	РАБОТА С ИМИТАТОРОМ NETSTAR .....	5
3	ПРИМЕР ОТОБРАЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕТЬЮ ПЕТРИ.....	9
4	ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ .....	14
5	КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.....	15
6	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	16

**Цель работы** – приобретение практических навыков проведения имитационных экспериментов на разработанных моделях с целью выявления «узких мест» в технологии и согласования времени выполнения технологических операций.

При выполнении лабораторной работы студенты должны разработать имитационную модель технологии с помощью сетей Петри и проблемно-ориентированного имитатора NETSTAR. Затем путем проведения имитационных экспериментов исследовать влияние на производительность времени выполнения технологических операций и на основе результатов исследований выявить «узкие места» в технологии.

Примечание:





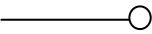
Предполагается, что студент владеет навыками работы в MS Excel 2007 или более поздними версиями.

## 1 ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### Отображение систем в виде сетей Петри

Сеть Петри состоит из следующих элементов (табл.1).

Таблица 1

Основные элементы сети Петри	
Графическое обозначение	Элемент сети Петри
	<b>Маркер</b> - динамический элемент сети. Отображает заготовки, детали, транспортные средства и т. д.)
	<b>Позиция (Р)</b> – вершина графа сети. Задерживает маркеры на время выполнения операций и процессов (погрузка, обработка, транспортировка и т. д.)
	<b>Переход (Т)</b> – вершина графа сети. Задаёт логику движения маркеров по сети.
	<b>Дуга</b> – определяет направление движения маркеров
	<b>Ингибиторная дуга</b> – запрещает срабатывание перехода, если в позиции, из которой она выходит, находится маркер.

Сеть Петри представляет собой двудольный ориентированный граф с вершинами двух типов: позициями  $P_i$  и переходами  $T_j$ . Динамика системы отображается движением маркеров через переходы от начальной к конечным позициям. Маркеры задерживаются в промежуточных позициях на время выполнения техно-

логических операций. Логика работы технологической системы задается правилами движения маркеров через переходы  $T_j$ :

1. Если к переходу  $T_j$  подходит более одной дуги, то он открывается после выполнения последней операции в позициях, из которых к нему подходят дуги;

2. Дуга может иметь кратность, соответствующую числу проходящих через нее маркеров. Переход разрешен, если число маркеров во входной позиции не меньше кратности дуги из этой позиции;

3. Если к переходу подходит несколько дуг, а выходит одна дуга, то несколько маркеров сливаются в один. Если к переходу подходит одна дуга, а выходят несколько дуг, то после перехода один маркер делится на несколько по числу дуг;

4. Переходы могут иметь разные приоритеты. В этом случае маркер сначала движется через переход с более высоким приоритетом;

5. Ингибиторная дуга, запрещает открывание перехода  $T_j$ , если в позиции, откуда она выходит, имеется маркер.

## 2 РАБОТА С ИМИТАТОРОМ NETSTAR

Имитатор NETSTAR разработан для компьютерной имитации дискретных процессов, представленных сетями Петри. На рис.2-1 представлено основное рабочее поле имитатора с модулями: «Граф сети», «Структура сети», «Результаты имитационного эксперимента», «Режим отладки».

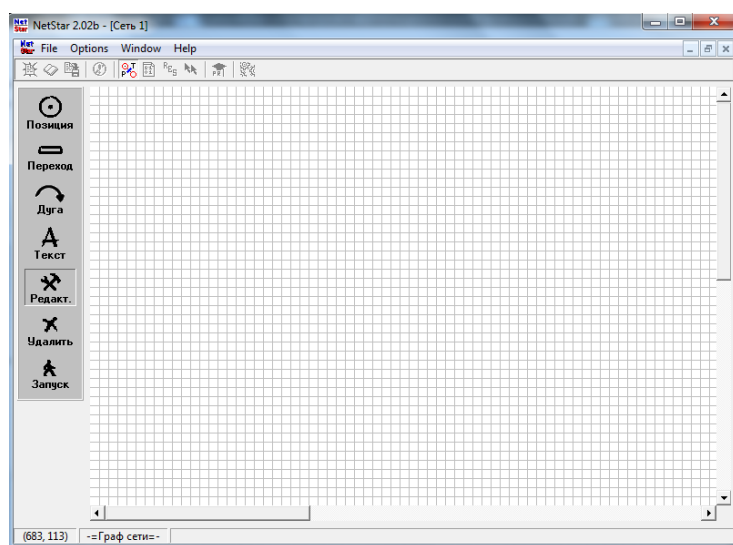


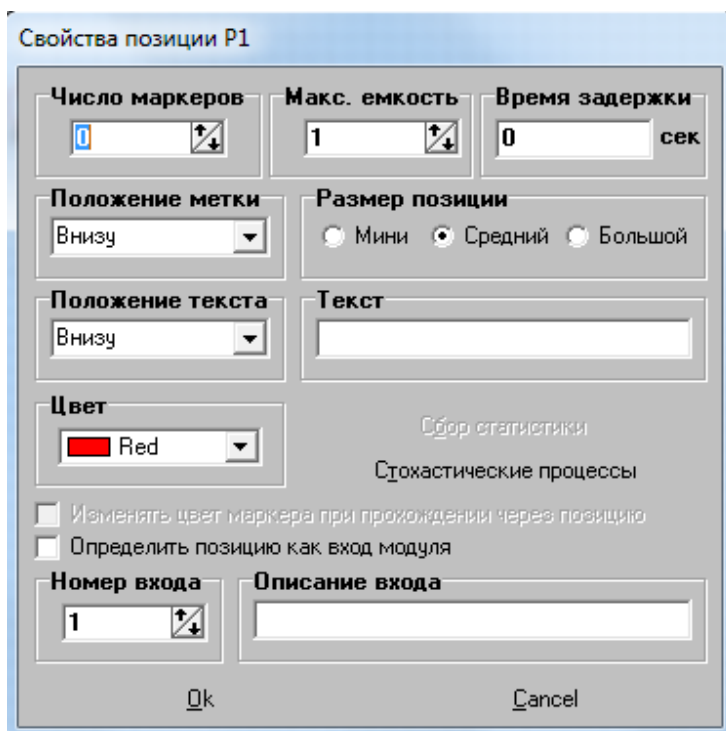


Рис.2-1 Рабочее поле имитатора NETSTAR

## Модуль «Граф сети»

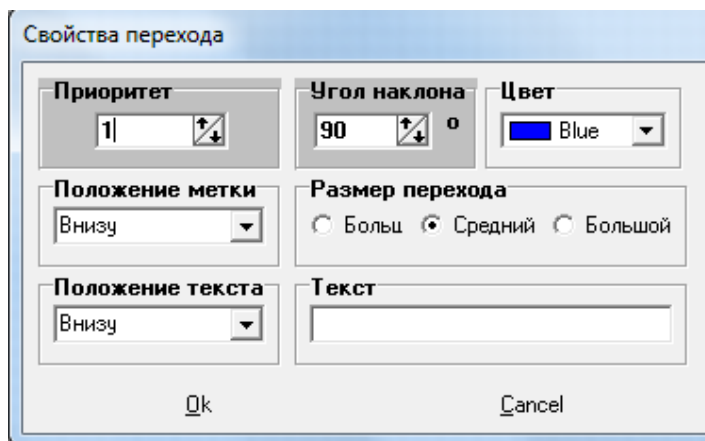
Модуль открывают нажатием кнопки (  ). Модель собирают путем фиксации элементов сети на рабочем поле. Параметры элементов сети Петри (времена задержек, приоритеты переходов, кратности дуг) задают нажатием кнопки «Редактирование» (  ) и выбором соответствующего элемента сети (рис. 2-2, 2-3, 2-4).



Свойства позиции P1

Число маркеров 0	Макс. емкость 1	Время задержки 0 сек
Положение метки Внизу	Размер позиции <input type="radio"/> Мини <input checked="" type="radio"/> Средний <input type="radio"/> Большой	
Положение текста Внизу	Текст	
Цвет Red	Сбор статистики Стохастические процессы	
<input type="checkbox"/> Изменять цвет маркера при прохождении через позицию		
<input type="checkbox"/> Определить позицию как вход модуля		
Номер входа 1	Описание входа	
Ok Cancel		

Рис. 2-2 Задание свойств позиции



Свойства перехода

Приоритет 1	Угол наклона 90 °	Цвет Blue
Положение метки Внизу	Размер перехода <input type="radio"/> Больш <input checked="" type="radio"/> Средний <input type="radio"/> Большой	
Положение текста Внизу	Текст	
Ok Cancel		

Рис. 2-3 Задание свойств перехода

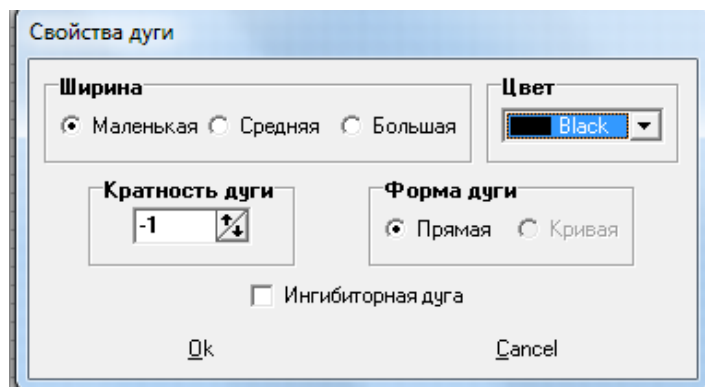


Рис. 2-4 Задание свойств дуги

В позиции можно ввести случайное время задержки маркеров, выбрав заданный закон распределения случайной величины и задав соответствующие параметры (рис. 2-5).

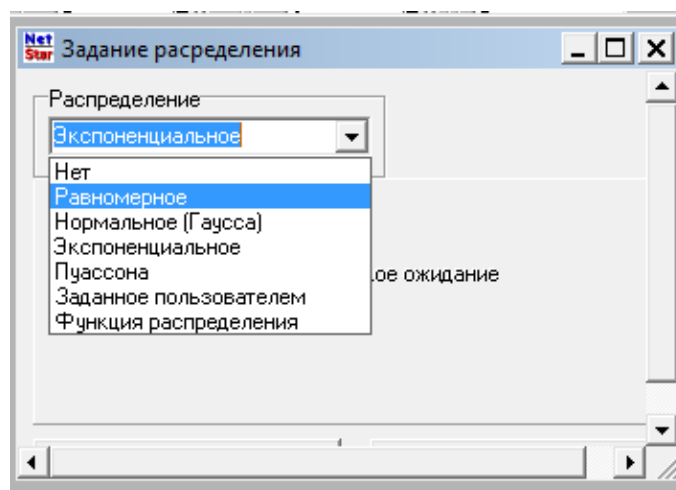



Рис. 2-5. Выбор закона распределения

Комментарии к сети Петри можно ввести нажатием кнопки «Текст» (  ) (рис. 2-6).

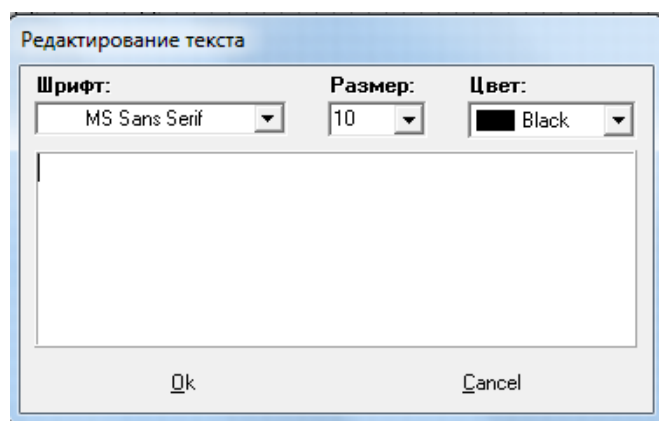



Рис. 2-6 Ввод комментариев к сети

Имитационный эксперимент запускается нажатием кнопки «Запуск» (  ). После ее нажатия задают (рис. 2-7):

- Время имитационного эксперимента;
- Шаг имитации (если выбран пункт Options |Фиксировать шаг времени);
- Число проходов (повторений имитационного эксперимента);
- Начальную и конечную позиции, между которыми проводится эксперимент.

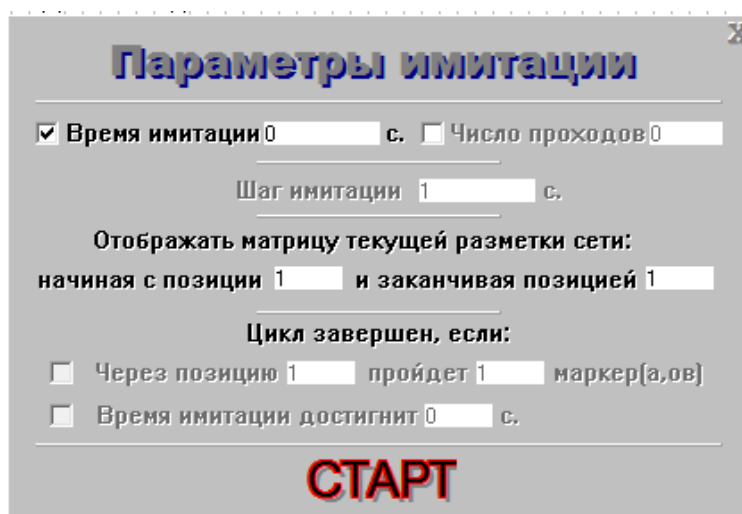



Рис. 2-7 Задание параметров имитации




### Модуль «Результаты экспериментов»

Модуль открывается нажатием кнопки (  ), после чего появляется матрица текущей маркировки (рис. 2-8), которая показывает размещение маркеров в позициях сети Петри на каждом шаге модельного времени. Оценивая движение маркеров между заданными позициями, пользователь определяет время рабочего цикла или производительность системы с заданными параметрами элементов.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	
0,00	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	0:0	
10,00	1:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	T1 T2 T3
20,00	1:0	0:0	0:1	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	T1 T2
21,25	1:0	0:0	0:1	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T4
30,00	1:0	0:0	0:2	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
40,00	1:0	0:0	0:3	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
50,00	1:0	0:0	0:4	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
60,00	1:0	0:0	0:5	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
70,00	1:0	0:0	0:6	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
80,00	1:0	0:0	0:7	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
90,00	1:0	0:0	0:8	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
100,00	1:0	0:0	0:9	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
110,00	1:0	0:0	0:10	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
120,00	1:0	0:0	0:10	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	0:0	T1 T2
121,25	1:0	0:0	0:10	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	T5
130,00	1:0	0:0	0:10	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	T1 T2
136,75	1:0	0:0	0:10	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T6
140,00	1:0	0:0	0:10	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T1 T2
150,00	1:0	0:0	0:10	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T1 T2

Рис. 2-8 Матрица текущей маркировки

### Модуль «Режим отладки»

Режим отладки помогает при проверке адекватности модели. Вход в режим отладки осуществляется путем нажатия на кнопку (  ). После этого необходимо нажать кнопку «Запуск» в левом меню. Затем в меню «Параметры имитации» задать время имитации и нажать кнопку «СТАРТ». После этого рядом с кнопкой режима отладки появятся кнопки – «Запустить отладку» (  ), при помощи которой можно последовательно проследить движение маркеров по сети Петри и «Закончить отладку» (  ).

## 3 ПРИМЕР ОТОБРАЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕТЬЮ ПЕТРИ

### Описание объекта моделирования

Робот берет заготовку из накопителя З, устанавливает ее в станок С и после обработки переносит деталь в накопитель Д (рис. 3-1).

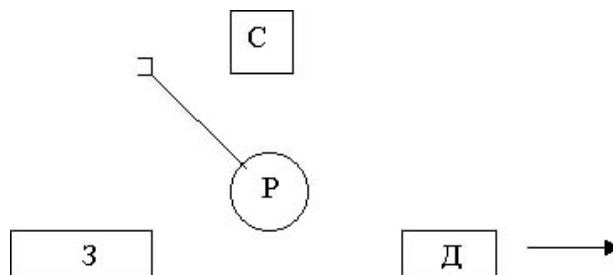


Рис. 3-1 Схема технологии

*Исходные параметры:*

1. Время обработки заготовки – 1,8 с.
2. Характеристики робота с цикловой системой управления:
  - Скорость задвижения/выдвижения манипулятора – 0,3 м/с;
  - Скорость углового перемещения – 120 град/с;
  - Время захвата – 1 с;
  - Величина выдвижения манипулятора – 150 мм.

*Задание:*

1. Используя имитатор NETSTAR, постройте сеть Петри, отображающую работу технологической системы;
2. Используя имитатор NETSTAR, проведите имитационные эксперименты и оцените время изготовления одной детали.

*Выполнение работы:*

Предварительные расчеты:


- Время линейного перемещения рабочего органа:  

$$t_{po} = 150(\text{мм}) / 0,3(\text{м/с}) = 0,5 \text{ с.}$$
- Время полного поворота:  

$$t_{пп} = 120^\circ / 120\text{с} = 1 \text{ с.}$$
- Время поворота от накопителя З к станку С и от станка С к накопителю Д:  

$$t_{п} = 1\text{с} / 2 = 0,5 \text{ с.}$$

Элементы матрицы ингибиторных дуг заполнены нулями, т. к. в сети нет ингибиторных дуг.

Используя имитатор NETSTAR, построим сеть Петри, отображающую работу технологической системы. Для этого запускаем имитатор сетей Петри двойным щелчком мыши на файле NetStar.exe (  NetStar.exe ). В появившейся оболочке редактора, путем нажатия на кнопку «Позиция» расставляем требуемые пози-

ции. Нажатием на кнопку «Переход» – переходы сети Петри. Нажатием на кнопку «Дуга» расставляем дуги сети Петри (рис. 3-2).

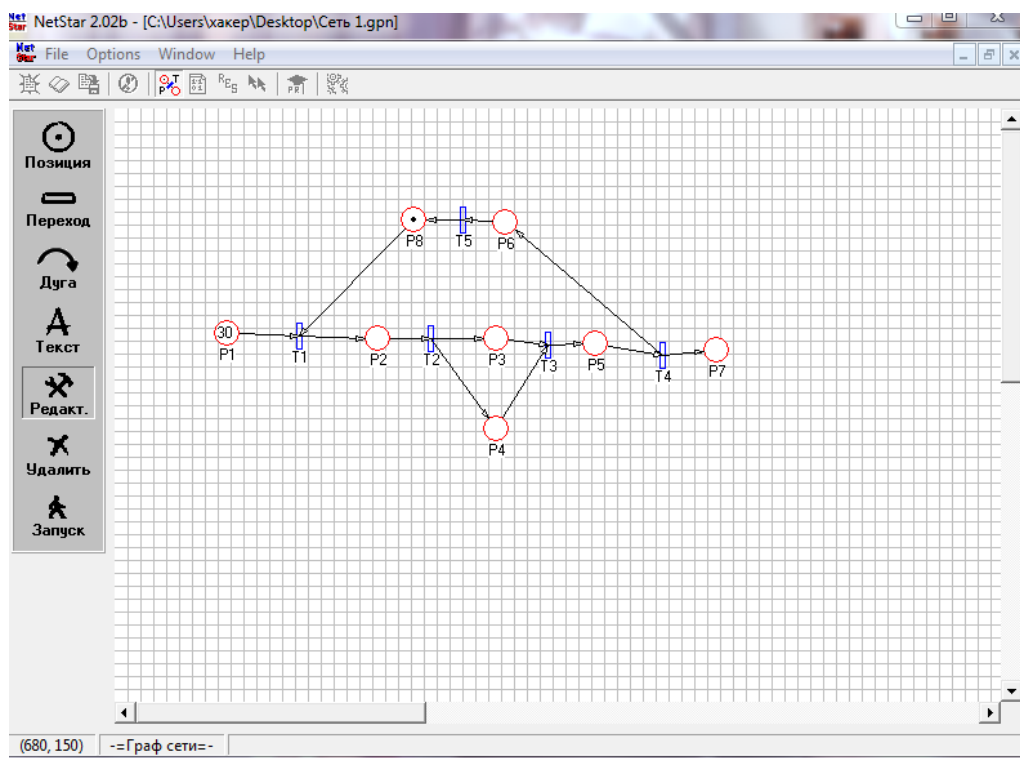


Рис. 3-2. Сеть Петри в NETSTAR

Описание позиций:

- P1 – Нахождение заготовки в накопителе
- P2 – Манипулятор захватывает заготовку и переносит ее к станку
- P3 – Обработка заготовки на станке
- P4 – Нахождение манипулятора в промежуточном положении на время обработки;
- P5 – Манипулятор забирает готовую деталь и переносит ее в накопитель деталей;
- P6 – Возвращение манипулятора к накопителю заготовок;
- P7 – Склад готовых деталей;
- P8 – Манипулятор находится возле накопителя заготовок.

Определим временные задержки маркеров в соответствующих позициях, отображающих технологические операции.

- P1 = 0 с. (Заготовка в накопителе 3).

- $P2 = 4,5$  с. (Перенос заготовки к станку = (Выдвиг 0,5)+(Захват 1с)+(Задвиг 0,5с)+(Поворот 0,5)+(Выдвиг 0,5)+(Отпуск 1)+(Задвиг 0,5)).
- $P3 = 1,8$  с. (Обработка заготовки).
- $P4 = 0,5$  с. (Отвод манипулятора в промежуточное положение).
- $P5 = 5$  с. (Перенос детали в накопитель Д (P7) ((Поворот 0,5)+(Выдвиг 0,5)+(Захват 1с)+(Задвиг 0,5с)+(Поворот 0,5)+(Выдвиг 0,5) +(Отпуск 1)+(Задвиг 0,5)).
- $P6 = 1$ с. (Возврат манипулятора для захвата новой заготовки).
- $P7 = 0$ с. (Заготовка в накопителе Д).
- $P8 = 0$ с. (Манипулятор возле накопителя заготовок).

Зададим каждой позиции свои временные задержки, используя меню «Свойства позиции», которое открывается путем нажатия правой кнопки мыши на соответствующей позиции (рис. 3-3).

Свойства позиции P2

Число маркеров: 0    Макс. емкость: 1    Время задержки: 4.5 сек

Положение метки: Внизу    Размер позиции: ☐ Мини ☒ Средний ☐ Большой

Положение текста: Внизу    Текст:

Цвет: Red

☐ Изменять цвет маркера при прохождении через позицию

☐ Определить позицию как вход модуля

Номер входа: 1    Описание входа:

Сбор статистики

Стохастические процессы

Ok    Cancel

Рис. 3-3 Задание свойств позиции

После редактирования сети сохраняем ее путем нажатия на опцию «Файл» в верхнем меню редактора и подопцию «Сохранить граф сети». На запрос об имени файла вводим уникальное имя. Файл сохранится в заданной директории с автоматическим расширением .net.

Для запуска сети нажимаем кнопку «Запуск» и в появившемся окне «Параметры имитации», задаем общее время имитации (заданное время имитации должно быть больше чем сумма времен во всех позициях сети) (рис. 3-4).

**Параметры имитации**

☒ Время имитации 10000 с. ☐ Число проходов 0

Шаг имитации 1 с.

Отображать матрицу текущей разметки сети:  
начиная с позиции 1 и заканчивая позицией 7

Цикл завершен, если:

☐ Через позицию 7 пройдет 1 маркер[a,ов]

☐ Время имитации достигнет 0 с.

**СТАРТ**

Рис. 3-4. Запуск имитации

По завершении имитации, программа выдаст на экран время цикла и матрицу текущей маркировки сети, где отображены все события, происходящие в сети (рис.3-5).

NetStar 2.02b - [C:\Users\vakex\Desktop\Сеть 1.gpn]

File Options Window Help

Время цикла: 369 сек.

Статистика

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
0,00	0:29	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	T1
4,50	0:29	0:0	1:0	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	T2
5,00	0:29	0:0	1:0	0:1	0:0	0:0	0:0	0:0	
6,30	0:29	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:0	0:0	T3
11,30	0:29	0:0	0:0	0:0	0:0	1:0	0:1	0:0	T4
12,30	0:28	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T5 T1
16,80	0:28	0:0	1:0	1:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T2
17,30	0:28	0:0	1:0	0:1	0:0	0:0	0:1	0:0	
18,60	0:28	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:1	0:0	T3
23,60	0:28	0:0	0:0	0:0	0:0	1:0	0:1	0:0	T4
24,60	0:27	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T5 T1
29,10	0:27	0:0	1:0	1:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T2
29,60	0:27	0:0	1:0	0:1	0:0	0:0	0:1	0:0	
30,90	0:27	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:1	0:0	T3
35,90	0:27	0:0	0:0	0:0	0:0	1:0	0:1	0:0	T4
36,90	0:26	1:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T5 T1
41,40	0:26	0:0	1:0	1:0	0:0	0:0	0:1	0:0	T2
41,90	0:26	0:0	1:0	0:1	0:0	0:0	0:1	0:0	
43,20	0:26	0:0	0:0	0:0	1:0	0:0	0:1	0:0	T3
48,20	0:26	0:0	0:0	0:0	0:0	1:0	0:1	0:0	T4

--Результаты--

Рис. 3-5 Матрица текущей маркировки

Так для нашего задания, необходимо смотреть статистику для позиции P7, отображающей накопитель с готовыми деталями. Первый маркер, попавший в эту позицию будет означать попада-

ние готовой детали в накопитель. Для нашей модели, это событие произойдет в момент времени 17,30 сек.

#### 4 ЗАДАНИЕ НА ЛАБОРАТОРНУЮ РАБОТУ

##### Описание объекта моделирования:

Робот Р в цилиндрической системе координат обслуживает размещенное по окружности оборудование: переносит деталь из станка 3.3 в накопитель 2, переносит полуфабрикат со станка 3.2 на станок 3.3, затем переносит предыдущий полуфабрикат из станка 3.1 на станок 3.2 и подает заготовку из накопителя 1 на станок 3.1 (рис. 4-1).

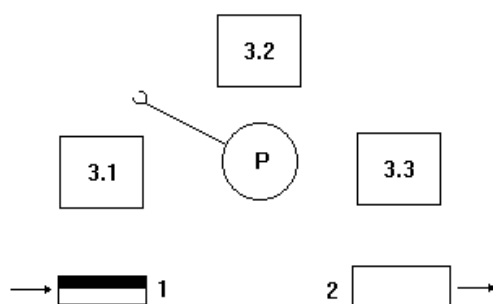


Рис. 4-1 Структурная схема РТК

##### Исходные параметры:

1. Время выполнения операций на каждом станке:

- сверление – 0.03 мин. (станок 3.1);
- зенкерование – 0.01 мин. (станок 3.2);
- нарезка резьбы – 0.04 мин. (станок 3.3).

2. Характеристики робота с цикловой системой управления:

- скорость задвига/выдвига манипулятора – 0.6 м/с;
- скорость углового перемещения – 120 град/с;
- время захвата / отпускания объекта – 1 с.;
- величина выдвижения манипулятора – 250 мм.

##### Задание:

1. Постройте сеть Петри, отображающую работу РТК. Рассчитайте время выполнения операций.

2. Определите операции («узкие места»), которые могут существенно повлиять на производительность РТК, поочередно изменяя задержки маркеров в позициях, отображающих обработку заготовки на станках.

3. В имитационных экспериментах оцените время изготовления одной детали (производительность) для каждого времени задержки в выбранной позиции через шаг в заданном интервале от 0,5 сек. до 18 сек. Определите «узкие места» в технологии по резкому изменению производительности при варьировании времени операций.

4. Постройте зависимости производительности РТК от времени задержки (выполнения операции) в выбранных позициях.

5. Выберите сочетание параметров оборудования, обеспечивающее максимальную производительность РТК.

**Отчет о работе должен содержать:**

1. Исходное описание работы РТК и задание.
2. Сеть Петри, отображающую работу РТК.
3. Описание последовательности проведения имитационных экспериментов.
4. Результаты каждого эксперимента в следующей последовательности:
  - исходные параметры;
  - изменяемые параметры (границы интервала изменения времени операций, шаг изменения).
5. График изменения производительности РТК от времени операции.
6. Выбор способа повышения производительности и параметров оборудования.

## **5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое «узкие места» в технологии?
2. Какие правила срабатывания переходов используются при моделировании на сетях Петри?
3. Какова последовательность действий при вводе сети Петри в компьютер при помощи имитатора NETSTAR?
4. Для чего можно использовать ингибиторную дугу?
5. Каким образом отображаются результаты моделирования при использовании имитатора NETSTAR?

## **6 СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
2. Мурата Т. Сети Петри: Свойства, анализ, приложения//ТИИЭР. – 1989. – №77. – С. 41-85.
3. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. – 3-е изд. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.
4. Введение в математическое моделирование: Учеб. пособие / Под ред. П. В. Трусова. – Москва : Логос, 2004. – 440 с.
5. Советов Б. Я. Моделирование систем: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – Москва : Высш. шк., 2001.