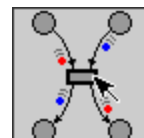


Министерство транспорта и связи Украины
Государственный департамент по вопросам связи и информатизации
Украинская национальная академия связи им. О. С. Попова

Кафедра сетей связи



Дисциплина:
Математическое моделирование информационных систем
Модули 1,2:
Модели дискретных систем,
Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools
для студентов

Д.А.Зайцев

Сети Петри и моделирование систем

*Методические указания к практическим занятиям и лабораторным работам
для подготовки магистров по направлению «Телекоммуникации»*

Одобрено
на заседании кафедры
«Сети связи»
Протокол № 4 от
10.11.2006 г.

УДК 621.39, 004.7, 51.681.3

План НМВ 2005/2006

Рецензент –
к.ф.-м.н., доцент И. В. Стрелковская

Составитель – к.т. н., доцент Д.А.Зайцев

Представлены задачи к практическим занятиям по изучению основ теории сетей Петри, лабораторные работы по практическому освоению методов анализа и синтеза сетей Петри с помощью компьютерных моделирующих систем PnDPI, Tina, Design/CPN (CPN Tools), а также лабораторные работы по проектированию телекоммуникационных сетей и управляющих систем на основе методов теории сетей Петри.

Утверждено
Советом факультета
Информационных сетей
Протокол № 5 от
16.11.2006 г.

Содержание

Введение.....	4
Практическое занятие 1. Построение моделей простых объектов.....	5
Лабораторная работа 1. Имитация динамики сетей Петри.....	7
Практическое занятие 2. Анализ свойств сетей с помощью дерева покрывающих маркировок	8
Лабораторная работа 2. Исследование ограниченности и безопасности сетевых моделей	10
Практическое занятие 3. Анализ свойств сетей с помощью фундаментального уравнения и инвариантов	12
Лабораторная работа 3. Поиск тупиков в моделируемых системах	14
Практическое занятие 4. Анализ свойств сетей с помощью редукции	15
Практическое занятие 5. Построение порождающего семейства функциональных подсетей	17
Лабораторная работа 4. Построение и исследования моделей локальных сетей	19
Лабораторная работа 5. Построение и исследования моделей сетевых протоколов	24
Лабораторная работа 6. Построение и исследования моделей систем автоматического управления	27
Приложение 1. Набор сетей Петри для исследования	32
Приложение 2. Индивидуальные задания к построению моделей систем	35
Приложение 3. Краткое описание используемых моделирующих систем	37
П.3.1. Моделирующая система rndpi	37
П.3.2. Моделирующая система Tina	37
П.3.3. Моделирующая система Design/CPN	38
Список рекомендованной литературы	40



Введение

Сеть Петри - это графическое и математическое средство моделирования систем и процессов. Как правило, сетями Петри моделируют параллельные (синхронные и асинхронные) системы и процессы. Сначала предложенные в докторской диссертации Карла Петри в 1962 году они получили дальнейшее развитие в работах таких ученых как Тадао Мурата, Курт Йенсен, Виталий Котов, Анатолий Слепцов. В последнее время проводится ежегодная конференция «Приложения и теория сетей Петри», издается в Боне информационный бюллетень «Новости сетей Петри» (Petri Net Newsletter), известно несколько сотен моделирующих систем для разных программно-аппаратных платформ, существуют реализации процессоров сетей Петри. Области применения сетей Петри включают исследование телекоммуникационных сетей, сетевых протоколов, вычислительных систем и вычислительных процессов, производственных и организационных систем.

В данных методических указаниях представленные задачи к практическим и лабораторным работам по изучению теории и приложений сетей Петри в дисциплине «Математическое моделирование информационных систем» для подготовки магистров в области связи. Основная теоретическая информация изложена в методическом пособии [1] и учебнике [2] (глава 14).

Практическое занятие 1

Построение моделей простых объектов

Цель занятия.

Изучить основные элементы сетей Петри, правила функционирования сети, освоить методику построения моделей параллельных процессов и систем.

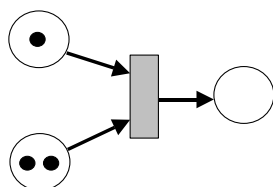
Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные элементы сетей Петри: позиция, переход, дуга, фишка, а также правила срабатывания переходов сети; представление последовательных, конвейерных, альтернативных, параллельных процессов, потребляемых, возобновляемых и частично-потребляемых ресурсов, динамику сети с кратными дугами.

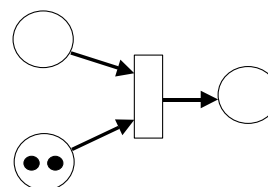
Задача 1.

Изучить правила срабатывания переходов сети: для заданной сети Петри (фрагмента сети) указать возбужденные переходы и маркировки, полученные в результате срабатывания разных переходов.

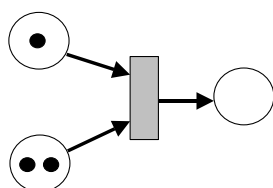
Пример



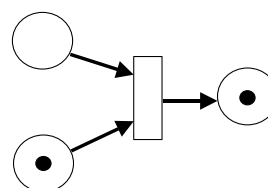
Переход разрешен



Переход не разрешен



После срабатывания

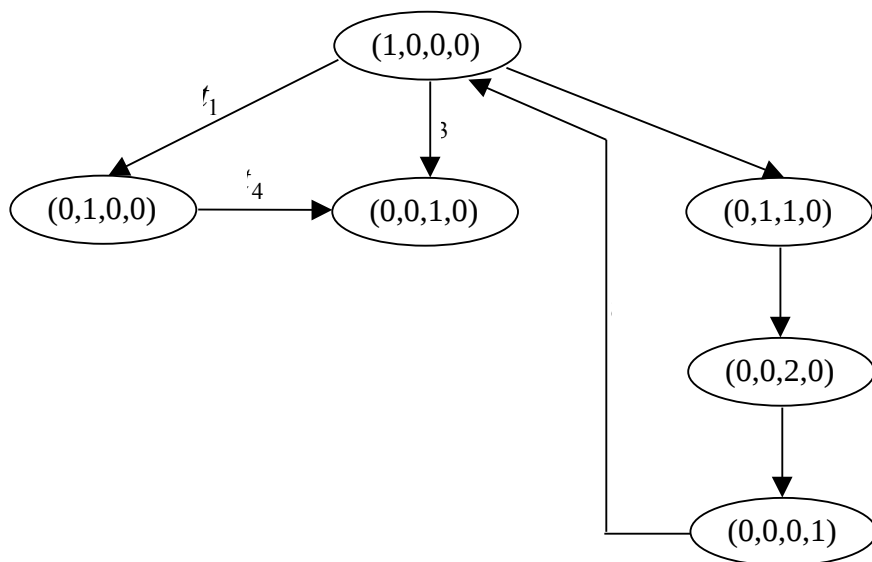


Задача 2.

Построить граф достижимых маркировок заданной сети Петри.

Пример.

Сеть 28, приложение 1.

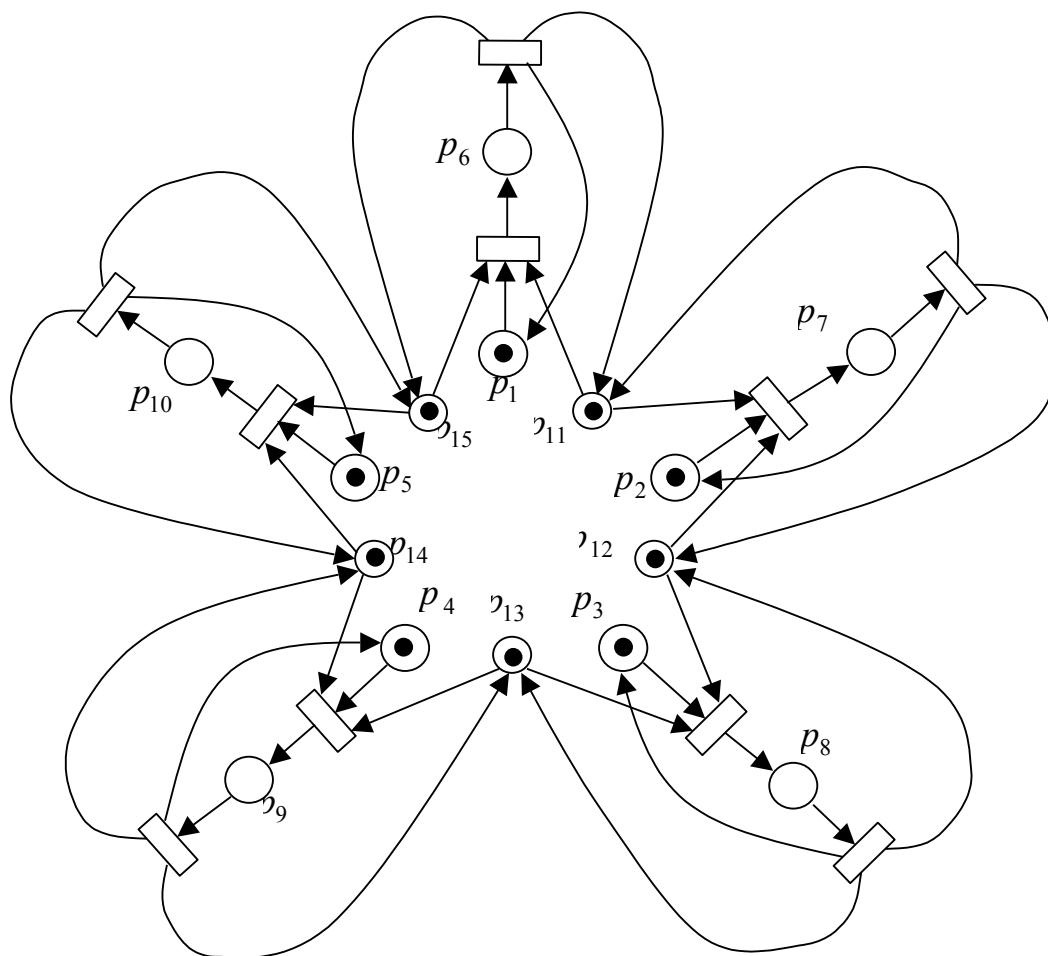


Задача 3.

Построить модель указанного объекта.

Пример.

Задача об обедающих философях (приложение 2, задача 1).



В построенной сети позиции $p_1 - p_5$ моделируют философов, которые размышляют, позиции $p_6 - p_{10}$ – философов, которые обедают, а позиции $p_{11} - p_{15}$ соответствуют вилкам.

Варианты заданий

Приложения 1, 2.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные элементы сети Петри.
2. Укажите основные области применения сетей Петри.
3. Сформулируйте условие возбуждения перехода сети Петри.
4. В чем заключается срабатывание перехода сети Петри?
5. Опишите коротко процесс функционирования сети Петри.
6. Укажите способы наглядного представления динамики сети Петри.
7. Что представляет собой графа достижимых маркировок сети Петри?
8. Какие сети Петри называют ординарными?

Лабораторная работа 1

Имитация динамики сетей Петри

Цель работы.

Изучить технологию графического ввода и редактирования сетей Петри в среде компьютерной моделирующей системы, освоить простейший способ исследования моделей с помощью имитации их динамики в пошаговом и автоматическом режимах.

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные элементы сетей Петри, представление разных процессов и ресурсных отношений, возможности компьютерной моделирующей системы по вводу и редактированию сетей и имитации их динамики.

Порядок выполнения работы

1. Запустить моделирующую систему.
2. Поочередно загрузить стандартные сети phil1, phil2, phil3.
3. Запускать возбужденные переходы сети, наблюдая результат их срабатывания.
4. Запустить сеть в автоматическом режиме.
5. Ввести и исследовать ранее изученные сети (по заданию преподавателя).
6. Построить сетевую модель указанного объекта.
7. Ввести и исследовать сетевую модель с помощью имитации ее динамики.

Указания к выполнению работы

Использовать моделирующие системы pndpi, Tina (Приложения 3.1, 3.2). Сначала загрузить указанные сети, которые входят в комплект моделирующей системы. Имитировать динамику сетей в пошаговом режиме, изучая правила возбуждения и срабатывание переходов.

При вводе сетей обеспечить наглядное размещение элементов. При исследовании сетей с помощью имитации динамики обратить внимание все ли переходы могут быть запущены, наблюдается ли неограниченное накопление фишек в позициях, есть ли последовательности запусков переходов, которые можно повторить.

Варианты заданий

Приложения 1,2.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте условие возбуждения перехода сети Петри.
2. В чем заключается срабатывание перехода сети Петри?
3. Опишите коротко процесс функционирования сети Петри.
4. Укажите способы наглядного представления динамики сети Петри.
5. Что представляет собой граф достижимых маркировок сети Петри?
6. Перечислите основные функции моделирующей системы.
7. Какие режимы имитации динамики сети обеспечивает моделирующая система?

Практическое занятие 2

Анализ свойств сетей с помощью дерева покрывающих маркировок

Цель занятия.

Освоить алгоритм построения дерева покрывающих маркировок для заданной сети Петри, а также методику исследования основных свойств сетей с помощью дерева покрывающих маркировок.

Подготовка.

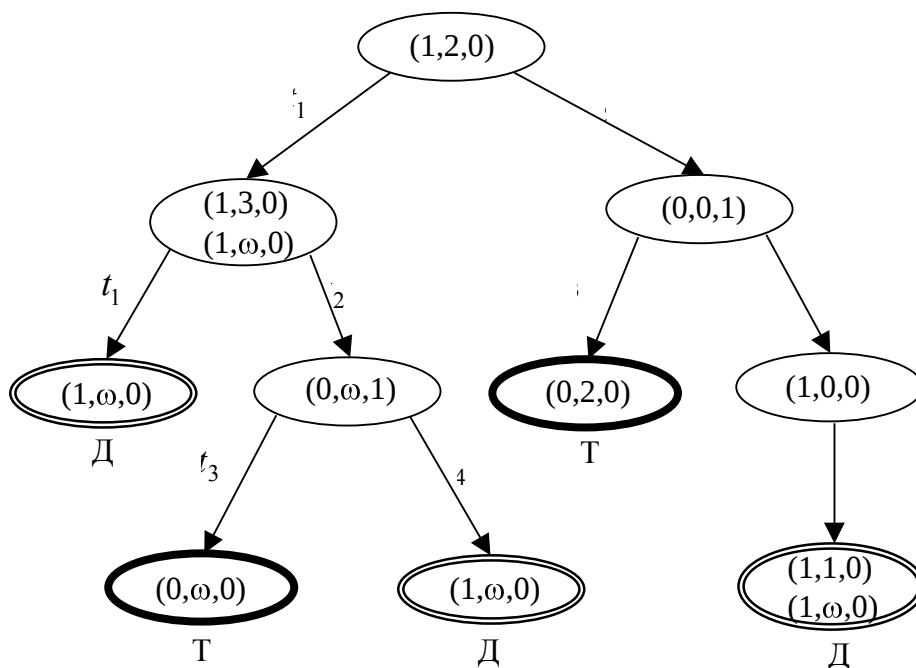
Для выполнения работы необходимо знать основные свойства сетей Петри: ограниченность, безопасность, достижимость, живость, стойкость, а также свойства псевдомаркировок и алгоритм построения дерева покрывающих маркировок сети Петри.

Задача 1.

Построить дерево покрывающих маркировок для заданной сети Петри.

Пример.

Сеть 29, приложение 1.



Задача 2.

С помощью дерева покрывающих маркировок определить, является ли заданная сеть ограниченной, консервативной, стойкой, живой.

Пример:

- сеть неограниченная, так как дерево содержит символы ω ;
- сеть потенциально живая, так как есть дуги, обозначенные символами каждого из переходов;
- сеть не живая, так как дерево содержит терминальные (тупику) вершины;
- сеть не стойкая, так как срабатывание перехода t_3 в маркировке $(0,0,1)$ делает невозможным дальнейший запуск возбужденного в этой маркировке перехода t_4 .

Задача 3.

С помощью дерева покрывающих маркировок определить достижимость указанных маркировок в сети.

Пример.

- маркировка $(0,7,1)$ достижима в сети; действительно, дерево содержит покрывающую маркировку $(0,\omega,1)$ по которому может быть построена последовательность срабатывания переходов $t_1^7 t_2$, которая переводит сеть в указанную маркировку;
- маркировка $(0,1,7)$ недостижима в сети, так как дерево не содержит для нее покрывающую маркировку.

Варианты заданий

Приложение 1.

Контрольные вопросы

1. Укажите особенности построения псевдомаркировок сети Петри.
2. Сформулируйте основные шаги алгоритма построения дерева покрывающих маркировок сети Петри.
3. Вершины каких типов содержит дерево покрывающих маркировок?
4. В каком случае конкретную маркировку позиции заменяют символом ω ?
5. Какие свойства сетей Петри позволяет определить дерево покрывающих маркировок?
6. Каким образом можно определить живость сети с помощью дерева покрывающих маркировок?
7. Каким образом можно определить достижимость маркировки с помощью дерева покрывающих маркировок?
8. Какой размер может иметь дерево покрывающих маркировок?

Лабораторная работа 2

Исследование ограниченности и безопасности сетевых моделей

Цель работы.

Освоить методику исследования ограниченности (безопасности) сетевых моделей с помощью компьютерной моделирующей системы

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные свойства сетей Петри, свойства псевдомаркировок, а также функции моделирующей системы.

Порядок выполнения работы

1. Исследовать ограниченность сетей, изученных на предыдущих занятиях (по заданию преподавателя).
2. Автоматически построить дерево покрывающих маркировок.
3. Определить ограниченность (безопасность) позиций и всей сети.
4. Убедиться в наличии (отсутствия) указанных свойств с помощью имитации динамики сети.
5. Построить и исследовать сетевую модель для указанного объекта; выполнить выбор емкости накопителей.

Указания к выполнению работы

Использовать моделирующую систему Tina (Приложение 3.2). Ввести в текстовом редакторе файл, который описывает структуру сети. Так, например, сеть 29, приложение 1 представляет файл

```
net n29
tr t1 p1 -> p1 p2
tr t2 p1 p2*2 -> p3
tr t3 p3 -> p2*2
tr t4 p3 -> p1
p1 p1 (1)
p1 p2 (2)
p1 p3 (0)
```

Загрузить файл в моделирующую систему и запустить автоматическое построение дерева достижимых и дерева покрывающих маркировок. Для указанной сети получим следующий результат

```
CLASSES:
0 : p1 p2*2
1 : p1 p2*w
2 : p2*w p3
3 : p2*w
4 : p3
5 : p2*2
6 : p1
REACHABILITY GRAPH:
0 -> t1/1, t2/4
1 -> t1/1, t2/2
2 -> t3/3, t4/1
3 ->
4 -> t3/5, t4/6
5 ->
6 -> t1/1
```

Сеть является неограниченной так как маркировки содержат символ ω .

Варианты заданий

Приложения 1, 2.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства сетей Петри?
2. Какие сети называют ограниченными и безопасными?
3. В чем заключается свойство консервативности сети Петри?
4. В чем заключается свойство живости сети Петри?
5. Какую разметку сети называют тупиковой?
6. Укажите особенности построения псевдомаркировок сети Петри.
7. Сформулируйте основные шаги алгоритма построения дерева покрывающих маркировок сети Петри.
8. Какие свойства сетей Петри позволяют определить дерево покрывающих маркировок?

Практическое занятие 3

Анализ свойств сетей с помощью фундаментального уравнения и инвариантов

Цель занятия.

Освоить методику решения фундаментального уравнения сети с помощью унимодулярных преобразований, нахождение инвариантов методом Тудика, а также использование инвариантов и решений фундаментального уравнения для анализа свойств сетей.

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные свойства сетей Петри, метод Тудика и метод приведения целой матрицы к нормальной форме Смита с помощью унимодулярных преобразований.

Задача 1.

Исследовать достижимость заданной маркировки с помощью фундаментального уравнения сети.

Пример.

Сеть 30, приложение 1.

Пусть $\mu = (2, 0, 1, 1, 4, 0)$.

Решим фундаментальное уравнение сети: $\bar{\mu} = \bar{\mu}_0 + C \cdot \bar{\sigma}$. Общее

целочисленное решение системы имеет вид $\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix} + k_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + k_2 \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 6 \\ 1 \end{bmatrix}$, где k_1, k_2

– произвольные неотрицательные целые числа. По минимальному решению можно построить следующую допустимую последовательность срабатываний переходов $t_1 t_5^3 t_3 t_4 t_1 t_5$. Таким образом, маркировка $\bar{\mu}$ достижима в сети.

Задача 2.

Исследовать ограниченность и консервативность сети с помощью р-инвариантов.

Пример.

Решим уравнение $\bar{x} \cdot C = 0$. Инварианты позиций имеют вид $\bar{x} = k \cdot (6, 1, 3, 3, 1)$, где k – произвольное натуральное число.

Сеть р-инвариантна, поскольку, например, инвариант (6,1,3,3,1) содержит все ненелевые компоненты. Итак, сеть ограничена и консервативна. Взвешенная сумма маркеров равняется $\bar{x} \cdot \bar{\mu}_0 = 9$. Маркировка позиций не превышает (2,9,3,3,9).

Задача 3.

Исследовать живость и стационарную повторяемость процессов сети с помощью t-инвариантов.

Пример.

Решим уравнение $C \cdot \bar{y} = 0$.

Инварианты переходов имеют вид $\bar{y} = k_1 \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + k_2 \cdot \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 6 \\ 1 \end{bmatrix}$, где k_1, k_2 –

произвольные неотрицательные целые числа.

Сеть t-инвариантная, поскольку, например инвариант $\begin{bmatrix} 3 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 6 \\ 2 \end{bmatrix}$ содержит

только натуральные компоненты. Указанному инварианту соответствует стационарно-повторяемая последовательность срабатывания переходов $\sigma = t_1 t_2 t_6 t_1 t_3 t_4 t_1 t_5 t_3 t_6$, которая содержит все переходы сети; итак, сеть потенциально живая.

Варианты заданий

Приложение 1.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте структуру фундаментального уравнения сети Петри.
2. Что представляет собой инвариант позиций сети Петри?
3. Что представляет собой инвариант переходов сети Петри?
4. Охарактеризуйте свойства инвариантных сетей Петри.
5. Каковы основные шаги метода Тудика?
6. Какие преобразования матриц называют унимодулярными?
7. Как выглядит матрица, представленная в нормальной форме Смита?

8. Охарактеризуйте сложность методов целочисленного решения линейных систем.

Лабораторная работа 3

Поиск тупиков в моделируемых системах

Цель работы.

Освоить методику поиска тупиков в параллельных процессах с помощью компьютерной моделирующей системы.

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные свойства сетей, особенно живость и безтупиковость, владеть методом сетевых инвариантов, уметь применять инварианты для исследования живости.

Порядок выполнения работы

1. Исследовать наличие тупиков в сетях, изученных на предыдущих занятиях.
2. Построить сеть в среде моделирующей системы.
3. Найти инварианты сети.
4. Сделать вывод об основных свойствах сети и наличии тупиков.
5. Найти тупик с помощью имитации динамики; выписать соответствующую последовательность срабатывания переходов.
6. Построить модель указанного объекта.
7. Исследовать модель на наличие тупиков.

Указания к выполнению работы

Использовать моделирующую систему Tina (Приложение 3.2). Ввести в текстовом редакторе файл, который описывает структуру сети.

Загрузить файл в моделирующую систему и запустить структурный анализ. Для сети 30, приложение 1 получим следующий результат

```
P-SEMI-FLOWS GENERATING SET -----
----
invariant
p1*6 p2 p3*3 p4*3 p5
T-SEMI-FLOWS GENERATING SET -----
----
consistent
t1*2 t3*2 t4 t5*6 t6
t1 t2 t6
```

Таким образом, сеть инвариантная. Дальнейшая имитация динамики и построение графа достижимых маркировок позволяет сделать вывод о том, что сеть не содержит тупиков.

Варианты заданий

Приложения 1, 2.

Контрольные вопросы

1. Пересчитайте основные свойства сетей Петри?
2. В чем заключается свойство живости сети Петри?
3. Какую разметку сети называют тупиковой?
4. Что представляет собой инвариант позиций сети Петри?
5. Что представляет собой инвариант переходов сети Петри?
6. Охарактеризуйте свойства инвариантных сетей Петри.
7. Которым образом можно использовать инварианты сети Петри для поиска тупиков?

Практическое занятие 4

Анализ свойств сетей с помощью редукции

Цель работы.

Приобрести навыки уменьшения размера (редукции) сетей с помощью преобразований, которые сохраняют их основные свойства.

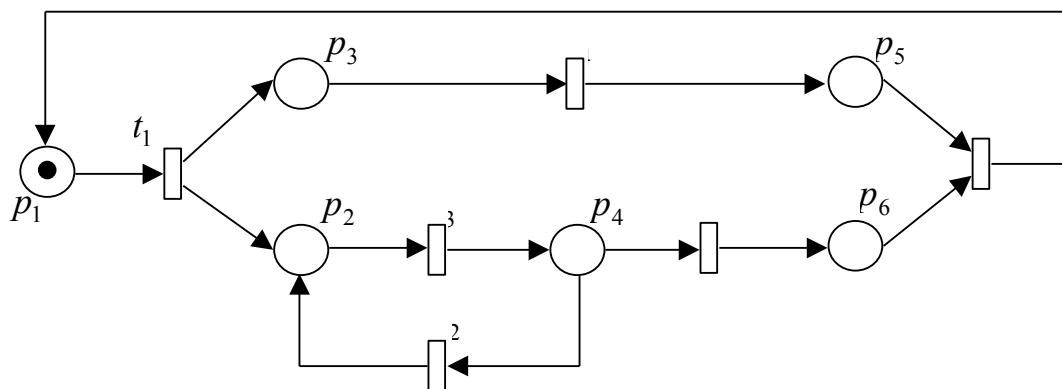
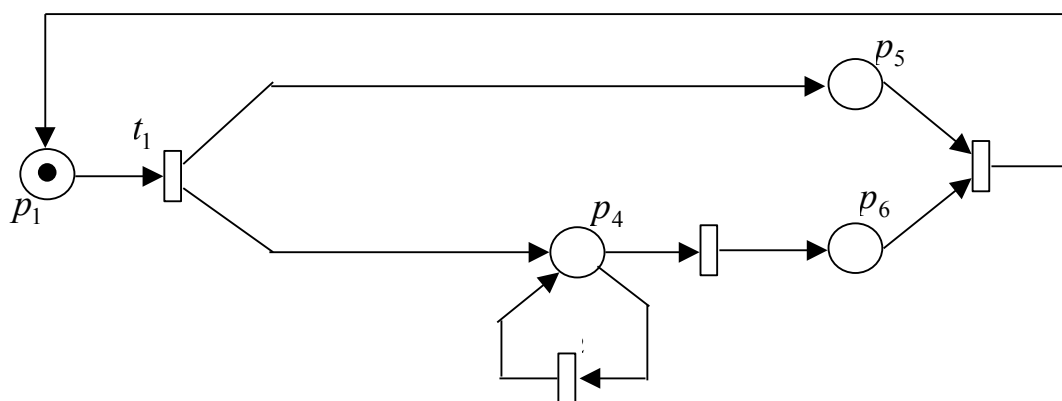
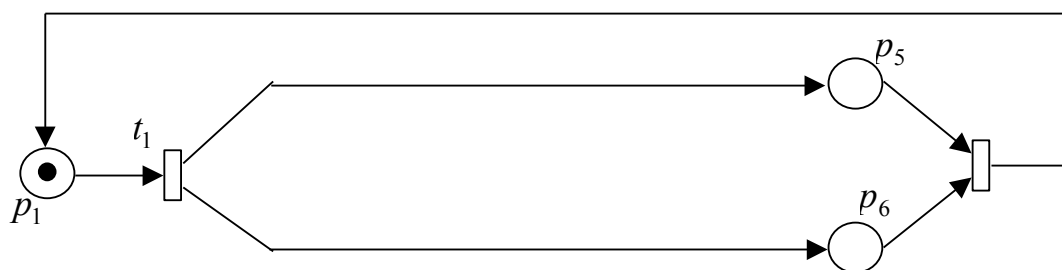
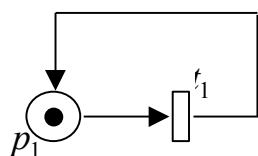
Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные свойства сетей Петри, набор правил редукции и условия применения правил для уменьшения размера сетей.

Задача

1. Выполнить несколько отдельных преобразований для каждого из правил редукции.
2. Выполнить редукцию указанных сетей.
3. Исследовать свойства сетей до и после редукции; убедиться в сохранении свойств.
4. Выполнить редукцию с помощью алгебраических преобразований уравнения состояний.
5. Исследовать модели реальных объектов с помощью редукции.

Пример


 $R_1(p_3)R_1(p_2)$

 $R_3(t_2)R_1(p_4)$

 $R_2(p_5)R_1(p_6)$


Полученная сеть живая, ограниченная, консервативная. Итак, указанными свойствами обладает исходная сеть.

Варианты заданий

Приложение 1.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается редукция сетей Петри?

2. Укажите основные правила редукции сетей Петри.
3. Перечислите основные свойства сетей Петри?
4. Какие сети называют ограниченными и безопасными?
5. В чем заключается свойство консервативности сети Петри?
6. В чем заключается свойство живости сети Петри?
7. Какую разметку сети называют тупиковой?

Практическое занятие 5

Построение порождающего семейства функциональных подсетей

Цель работы:

Освоить метод декомпозиции заданной сети Петри на функциональные подсети.

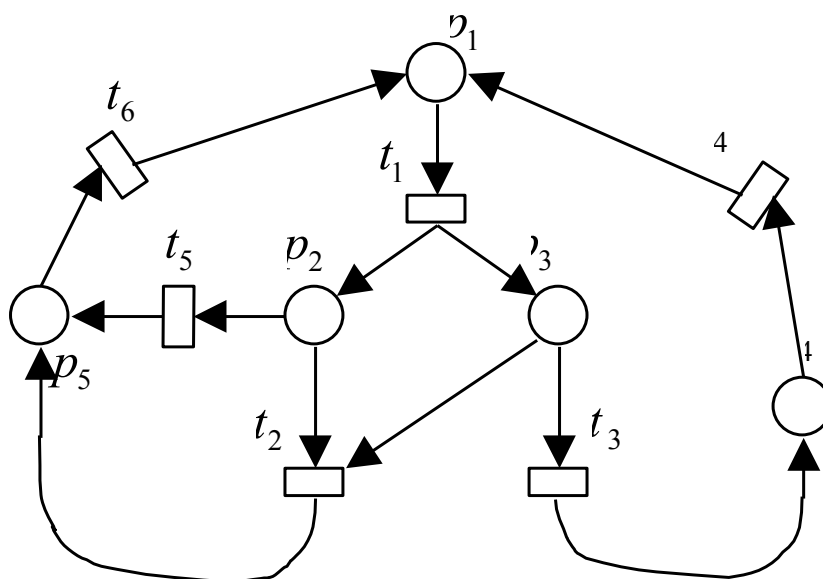
Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать определение функциональной подсети и минимальной функциональной подсети, а также алгоритмические и аналитические методы декомпозиции.

Задача

1. Построить систему логических уравнений, которые задают функциональную подсеть. Найти ее решение.
2. Выполнить построение порождающего семейства функциональных подсетей с помощью алгоритма декомпозиции.
3. Построить несколько функциональных подсетей, которые являются суммой минимальных.
4. Исследовать полученные неразделимые сети.

Пример



Система, которая задает функциональные подсети имеет вид

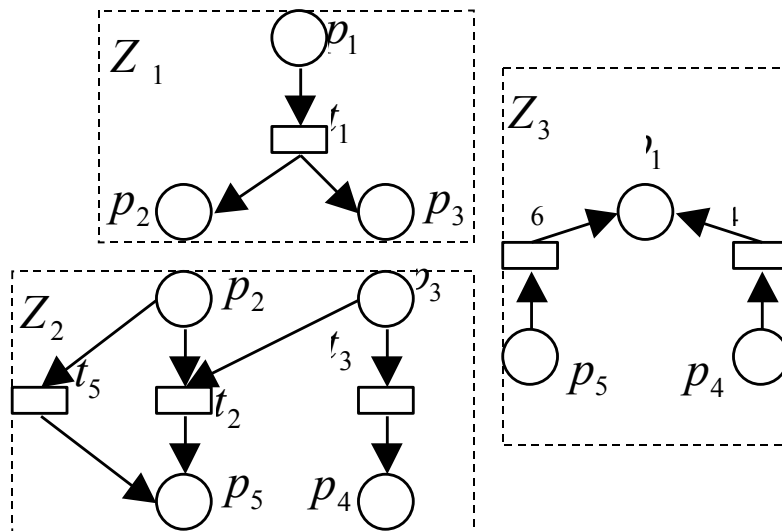
$$\begin{cases} \tau_1 \equiv (\tau_6 \tau_4 \tau_1 \vee \bar{\tau}_6 \bar{\tau}_4 \tau_1)(\tau_1 \tau_5 \tau_2 \vee \tau_1 \bar{\tau}_5 \bar{\tau}_2)(\tau_1 \tau_2 \tau_3 \vee \tau_1 \bar{\tau}_2 \bar{\tau}_3) \\ \tau_2 \equiv (\tau_1 \tau_5 \tau_2 \vee \bar{\tau}_1 \tau_5 \tau_2)(\tau_1 \tau_2 \tau_3 \vee \bar{\tau}_1 \tau_2 \tau_3)(\tau_5 \tau_2 \tau_6 \vee \tau_5 \tau_2 \bar{\tau}_6) \\ \tau_3 \equiv (\tau_1 \tau_2 \tau_3 \vee \bar{\tau}_1 \tau_2 \tau_3)(\tau_3 \tau_4 \vee \tau_3 \bar{\tau}_4) \\ \tau_4 \equiv (\tau_3 \tau_4 \vee \bar{\tau}_3 \tau_4)(\tau_1 \tau_4 \tau_6 \vee \bar{\tau}_1 \tau_4 \tau_6) \\ \tau_5 \equiv (\tau_1 \tau_5 \tau_2 \vee \bar{\tau}_1 \tau_5 \tau_2)(\tau_5 \tau_2 \tau_6 \vee \tau_5 \tau_2 \bar{\tau}_6) \\ \tau_6 \equiv (\tau_5 \tau_2 \tau_6 \vee \bar{\tau}_5 \bar{\tau}_2 \tau_6)(\tau_1 \tau_4 \tau_6 \vee \bar{\tau}_1 \tau_4 \tau_6) \end{cases}$$

Построим решение системы:

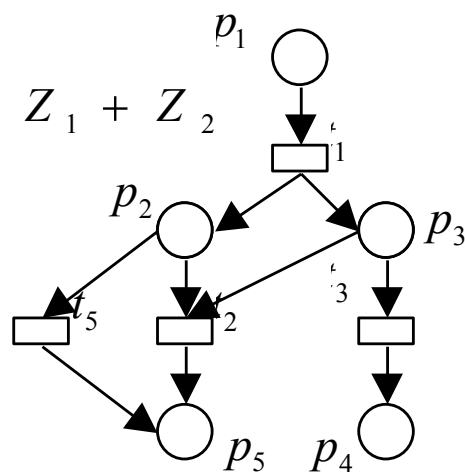
$$\bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 \bar{\tau}_3 \bar{\tau}_4 \bar{\tau}_5 \bar{\tau}_6 \vee \tau_1 \bar{\tau}_2 \bar{\tau}_3 \bar{\tau}_4 \bar{\tau}_5 \bar{\tau}_6 \vee \bar{\tau}_1 \bar{\tau}_2 \bar{\tau}_3 \tau_4 \bar{\tau}_5 \tau_6 \vee \bar{\tau}_1 \tau_2 \tau_3 \bar{\tau}_4 \tau_5 \bar{\tau}_6 \vee$$

$$\tau_1 \bar{\tau}_2 \bar{\tau}_3 \tau_4 \bar{\tau}_5 \tau_6 \vee \tau_1 \tau_2 \tau_3 \bar{\tau}_4 \tau_5 \bar{\tau}_6 \vee \bar{\tau}_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \tau_5 \tau_6 \vee \tau_1 \tau_2 \tau_3 \tau_4 \tau_5 \tau_6$$

Заметим, что первый из термов соответствует пустой подсети, следующие три термина соответствуют минимальным подсетям



Оставшиеся термы описывают суммы минимальных подсетей, например, шестой терм описывает подсеть вида



Варианты заданий

Приложение 1.

Контрольные вопросы

1. Какую сеть Петри называют функциональной?
2. Что представляет собой функциональная подсеть заданной сети Петри?
3. Может ли минимальная функциональная сеть содержать другую функциональную подсеть?
4. Чем задается минимальная функциональная подсеть?
5. Что представляет собой порождающее семейство функциональных подсетей?
6. Каким образом формируется система уравнений, которая задает функциональные подсети?
7. Укажите основные шаги алгоритма декомпозиции.
8. Какова сложность алгоритма декомпозиции сети Петри?

Лабораторная работа 4

Построение и исследования моделей локальных сетей

Цель работы.

Освоить методику исследования коммутированных локальных сетей с помощью раскрашенных сетей Петри.

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные классы сетей Петри и основы построения локальных коммутированных сетей, владеть навыками построения моделей, знать детально организацию моделирующей системы, уметь определять свойства сети, которыми должна обладать модель нормально функционирующего устройства.

Порядок выполнения работы

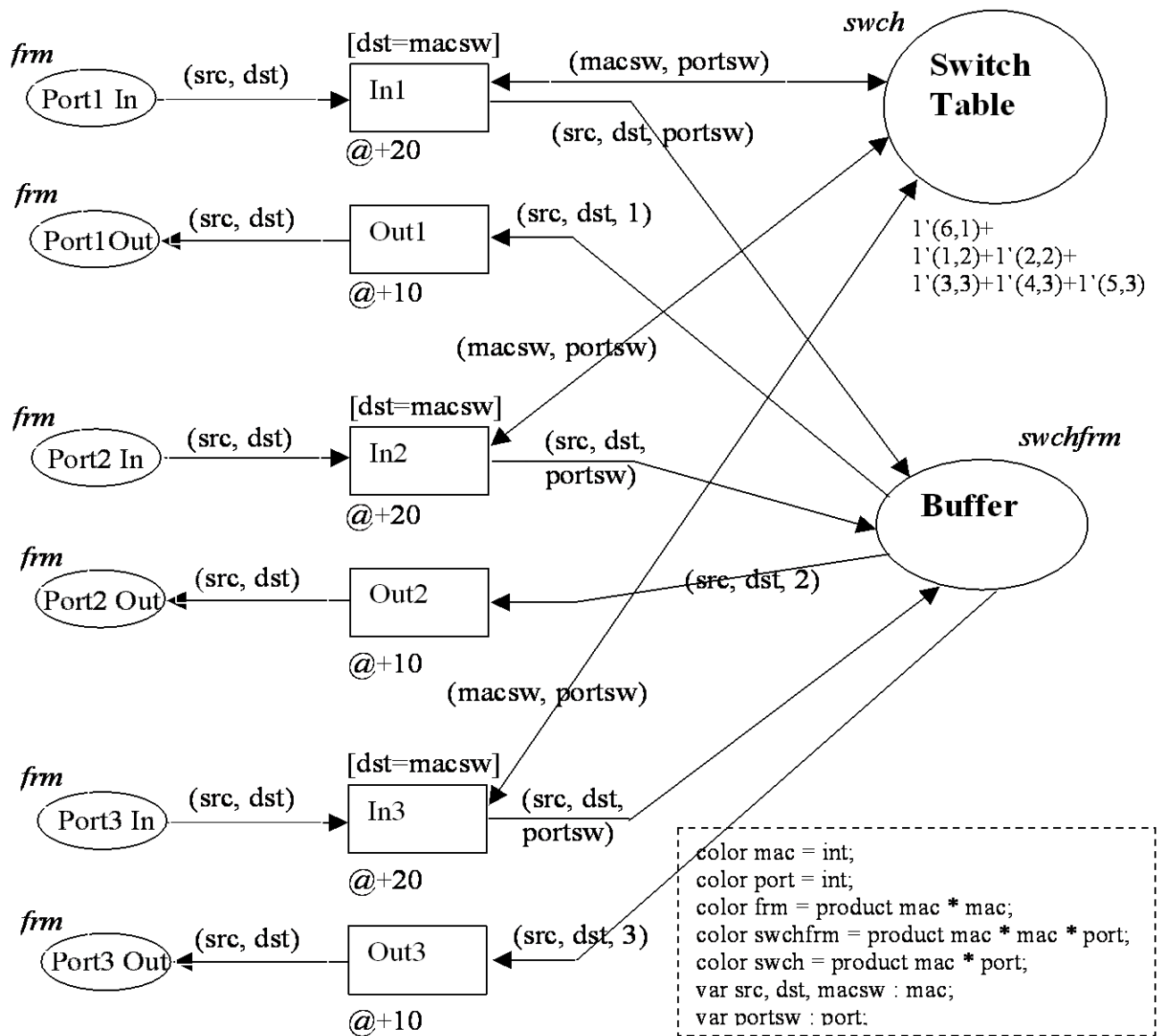
1. Построить модели основных сетевых устройств: коммутатора, сервера, рабочей станции.
2. Выполнить ввод сетей Петри в среде моделирующей системы.
3. Исследовать автономно модели сетевых устройств, имитируя входные потоки.
4. Построить модель локальной сети указанной структуры.
5. Выполнить графический ввод модели.
6. Исследовать модель, имитируя динамику сети.
7. Определить основные характеристики сети: время отклика, пропускную способность, загрузку.

Указания к выполнению работы

Для исследования моделей используем систему Design/CPN (Приложение 3.3). Рассмотрим возможности системы на примере построения модели коммутатора локальной сети Ethernet.

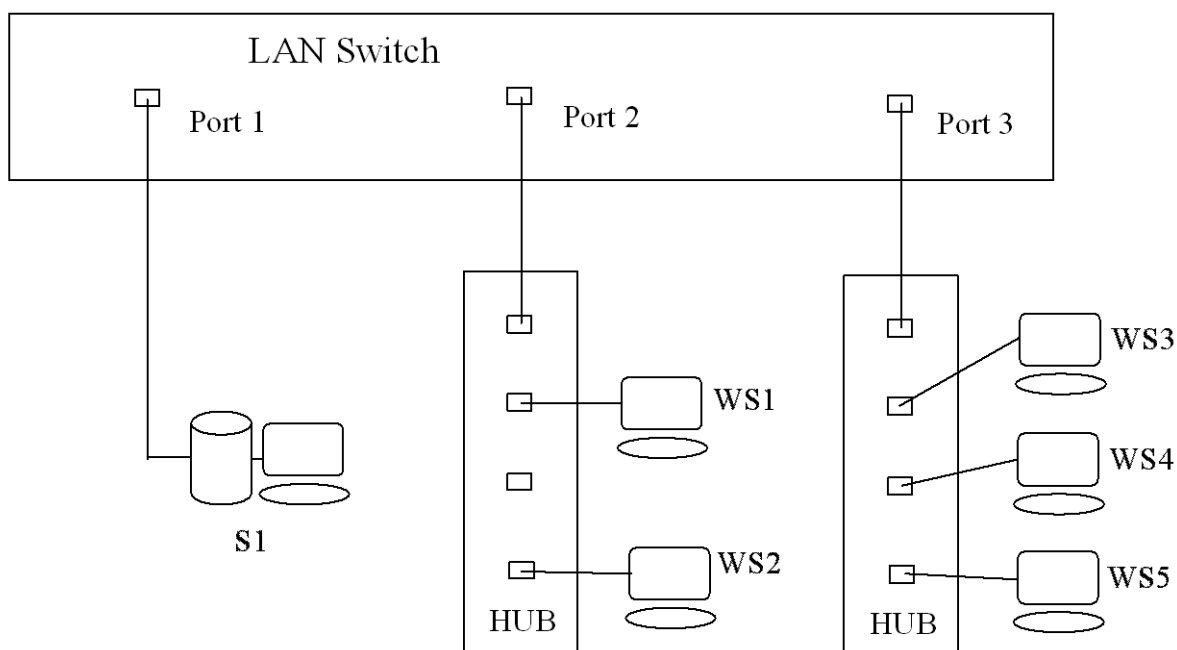


Функционирование сети Ethernet регламентируется стандартами IEEE 802.3. Важными для работы коммутатора являются поля кадра, которые задают адрес отправителя и адрес получателя. Для адресации используются шестибайтные уникальные MAC-адреса (Medium Access Control). Задача коммутатора заключается в перенаправлении поступившего кадра в тот порт, к которому подключено устройство назначения. Применение коммутатора позволяет снизить число коллизий, так как кадр ретранслируется только в порт назначения, и таким образом повысить пропускную способность сети. Для определения номера порта, на который направляется кадр, как правило, используется статическая или динамическая таблица коммутации, которая сопоставляет каждому известному MAC-адресу номер порта, к которому подключено соответствующее устройство. Алгоритмы динамического построения таблицы коммутации основаны на прослушивании трафика и использовании широковещательной рассылки для неизвестных MAC-адресов. Построим модель коммутатора, который имеет три порта:



Цвет *frm* описывает формат кадра, цвет *swch* задает формат записей таблицы коммутации, цвет *swchfrm* представляет формат скомутированных кадров. Модель содержит статическую таблицу коммутации *SwitchTable*, входные и исходные буферы портов *PortXIn*, *PortXOut*, буфер скомутированных кадров *Buffer*.

Типичная схема одноуровневой коммутированной локальной сети содержит коммутатор (LAN Switch) и сегменты локальной сети, подключенные к портам.



По назначению и особенностями формирования трафика в сети различают серверы и рабочие станции. Серверы, как правило, подключают непосредственно к коммутатору; рабочие станции объединяют в сегменты с помощью концентраторов (HUB). На схеме представлен сервер (S1) и два сегмента, которые содержат рабочие станции WS1, WS2 и WS3-WS5.

Для принятой степени детализации модели будем рассматривать периодически повторяемые, со случайными равномерно распределенными интервалами времени, запросы каждой из рабочих станций к серверам.

Сервер, в ответ на принятый запрос, отправляет несколько пакетов в адрес спрашивающей рабочей станции. Количество пакетов, которые отправляются, и временные задержки есть равномерно распределенные случайные величины.

Компоновку общей модели локальной сети следует выполнить с помощью объединения контактных позиций рабочих станций и серверов для каждого из сегментов. Модель коммутатора объединяется с моделью сегментов с помощью дополнительных переходов, которые принимают кадры во входной буфер и отправляют кадры из выходного буфера соответственно, для каждого из портов коммутатора.

Для измерения характеристик сети следует использовать дополнительные позиции, в которые рекомендуем помещать необходимую информацию. Так, например, для измерения времени отклика будем сохранять время отправления запроса и время поступления ответа от сервера.

Варианты заданий

Вариант	Серверов	Сегментов	Рабочих станций			Рабочая станция	Сервер	
			P1	P2	P3		St	Sq
1	2	3	2	2	3	2000-3000	50	12
2	3	2	2	2		3000-4000	60	10
3	2	3	3	2	1	2000-4000	40	15
4	3	2	3	2		4000-5000	20	20
5	2	3	3	3	2	3000-4000	30	17
6	2	2	4	2		3000-5000	70	8
7	2	3	2	4	2	2000-5000	10	19
8	2	2	3	4		5000-7000	50	5
9	2	3	2	2	3	3000-4000	20	11
10	3	2	2	2		4000-7000	30	14
11	2	3	3	2	1	2000-7000	40	10
12	3	2	3	2		3000-7000	10	18
13	2	3	3	3	2	5000-8000	30	13
14	2	2	4	2		7000-8000	60	4
15	2	3	2	4	2	4000-8000	20	10
16	2	2	3	4		3000-8000	40	7

P1, P2, P3 - количество рабочих станций в сегменте (на порту коммутатора);
Wt - интервал выдачи запросов рабочей станцией;
St - время выполнения запроса сервером;
Sq - количество кадров в ответе сервера.

Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит коммутированная сеть?
2. Коротко опишите структуру кадра сети Ethernet.
3. В чем заключается функция коммутатора локальной сети?
4. В чем заключаются особенности формирования трафика рабочими станциями и серверами?
5. Сформулируйте отличительные особенности раскрашенных сетей Петри.
6. Каким образом описывается тип данных фишек в раскрашенных сетях?
7. Которые дополнительные характеристики имеют позиции и переходы раскрашенной сети Петри?
8. Какие дополнительные характеристики имеют дуги раскрашенной сети Петри?

Лабораторная работа 5

Построение и исследование моделей сетевых протоколов

Цель работы.

Приобрести навыки верификации сетевых протоколов.

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные классы сетей Петри, иметь представления о сетевых протоколах, владеть навыками построения моделей, знать точные спецификации исследуемых протоколов.

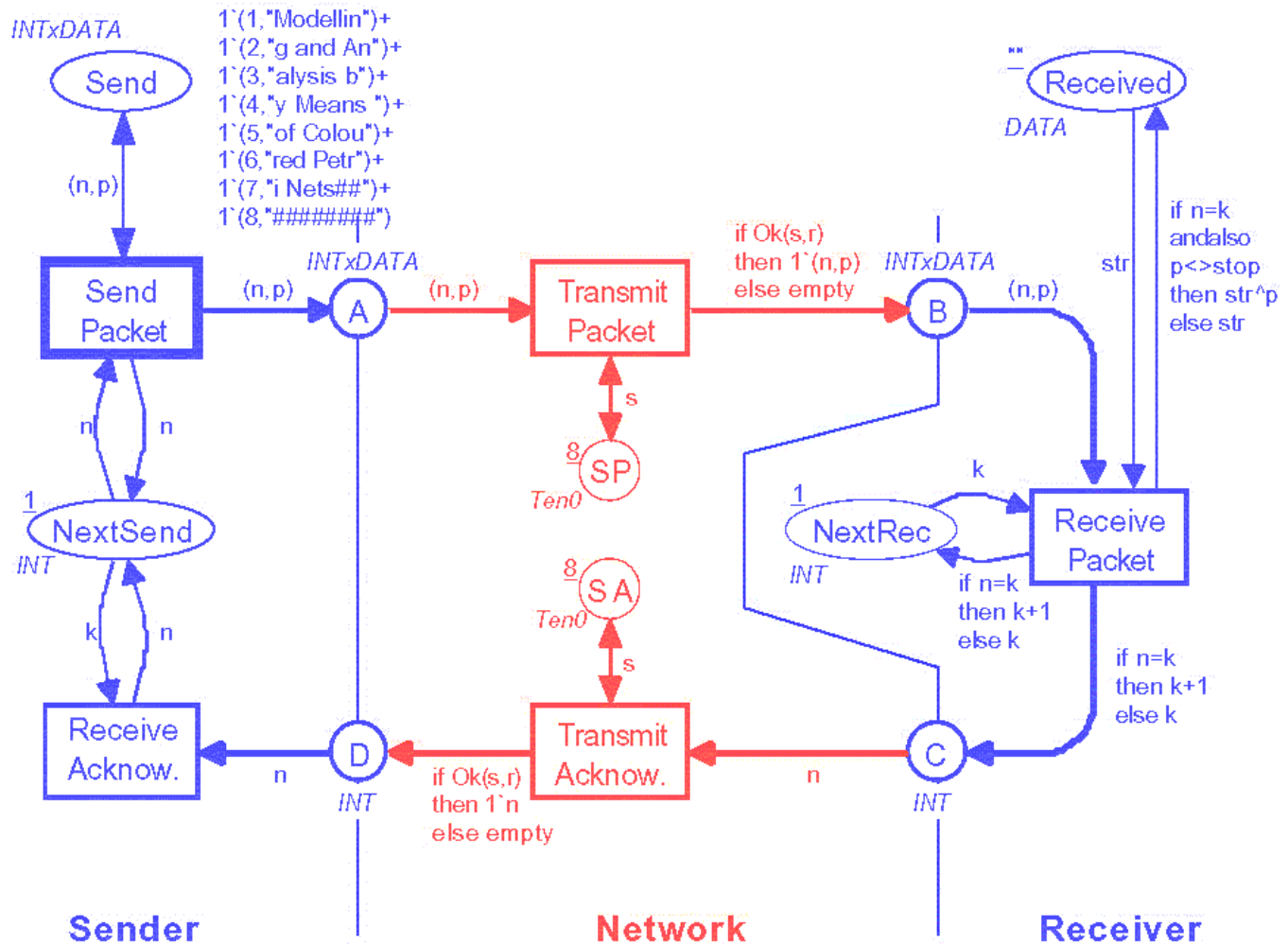
Порядок выполнения работы

1. Изучить учебную модель протокола.
2. Построить сеть Петри в среде моделирующей системы.
3. Выполнить имитацию динамики сети.
4. Определить ограниченность и живость модели.
5. Построить модель указанного протокола.
6. Выполнить графический ввод модели.
7. Выполнить верификацию протокола с помощью имитационных и аналитических методов.

Указания к выполнению работы

Для выполнения работы будем применять моделирующие системы Design/CPN (Приложение 3.3) и Tina (Приложение 3.2). Design/CPN использует раскрашенные сети Петри и позволяет строить модели с высокой степенью детализации, которые целиком отображают особенности исходных спецификаций протокола, но для исследования протокола в большинстве случаев практически применимы лишь имитационные методы. Tina предоставляет аналитические методы исследования, позволяя строить дерево покрывающих маркировок и инварианты; но модель протокола необходимо представить базовой сетью Петри, что неизбежно связано с абстрагированием от деталей описания исходных спецификаций.

Сетевой протокол представляет собой точно определенный порядок взаимодействия систем с целью обмена информацией. Рассмотрим пример простейшего протокола передачи сообщений с посылкой подтверждений.



```

color INT = int;
color DATA = string;
color INTxDATA = product INT * DATA;
var n, k : INT;
var p, str : DATA;
val stop = "#####";

color Ten0 = int with 0..10;
color Ten1 = int with 1..10;
var s : Ten0; var r : Ten1;
fun Ok(s:Ten0,r:Ten1) = (r<=s);

```

Отправленные пакеты находятся в позиции Send и состоят из номера пакета и данных, представленных строкой текста. Позиция NextSend задает номер текущего пакета. В позиции Received выполняется накопление данных из корректно полученных пакетов; текстовые строки конкатенируются. До получения подтверждения выполняется повторная передача пакета передающей стороной. Передача пакетов продолжается до получения специальной терминальной строки stop. Сеть моделируется парой переходов: передающим сообщение TransmitPacket и передающим подтверждение

TransmitAcknow. Возможна потеря сообщений и подтверждений при передаче. Вероятность нормальной передачи задается разметкой позиций SP и SA.

При выполнении работы следует дополнить протокол временными характеристиками, внести задержку перед повторной передачей пакета (таймаут), обеспечить передачу пакетов в разном порядке с последующей корректной их сборкой.

Для аналитического исследования свойств рекомендуем выполнить простое преобразование модели путем абстрагирования от характеристик элементов сети.

Варианты заданий

Вариант	Время передачи сообщения	Время передачи подтверждения	Таймаут	Вероятность нормальной передачи сообщения	Вероятность нормальной передачи подтверждения
1	4000	1000	6000	0.9	0.9
2	5000	1000	9000	0.8	0.9
3	2000	1000	4000	0.8	0.8
4	3000	2000	7000	0.7	0.8
5	1000	1000	4000	0.7	0.9
6	5000	2000	8000	0.6	0.7
7	4000	1000	7000	0.8	0.9
8	3000	2000	8000	0.9	0.9
9	2000	1000	5000	0.6	0.6
10	1000	1000	8000	0.7	0.6
11	5000	4000	9000	0.8	0.9
12	4000	3000	9000	0.9	0.7
13	3000	1000	6000	0.6	0.9
14	2000	1000	5000	0.7	0.7
15	1000	1000	3000	0.8	0.9
16	4000	1000	8000	0.6	0.8

Контрольные вопросы

1. Что такое сетевой протокол?
2. Какие сетевые протоколы вы знаете?
3. Для чего необходимо исследовать сетевые протоколы?
4. Что такое верификация протокола?
5. Какими свойствами должна обладать сеть Петри, которая моделирует корректный протокол?
6. Какие основные методы применяют для обеспечения надежной передачи информации через ненадежные каналы?

Лабораторная работа 6

Построение и исследования моделей систем автоматического управления

Цель работы.

Приобрести привычки построения и отладка систем автоматического управления, представленных сетями Петри.

Подготовка.

Для выполнения работы необходимо знать основные классы сетей Петри, владеть навыками построения моделей, изучить описание системы автоматического управления.

Порядок выполнения работы

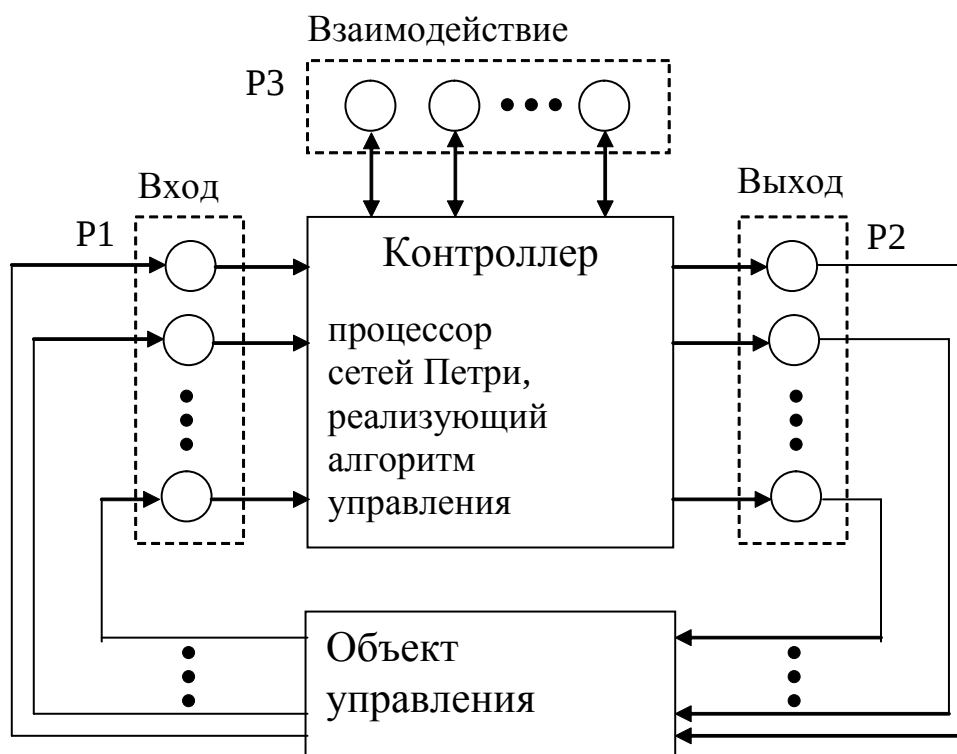
1. Изучить модель автоматического управления роботом-манипулятором.
2. Построить соответствующую сеть Петри в среде моделирующей системы.
3. Выполнить имитацию динамики сети.
4. Определить основные свойства сети.
5. Построить модель указанной системы управления и объекта управления.
6. Выполнить автономную отладку системы управления.
7. Выполнить комплексную отладку системы управления вместе с моделью объекта управления.
8. Исследовать свойства комплексной модели.

Указания к выполнению работы

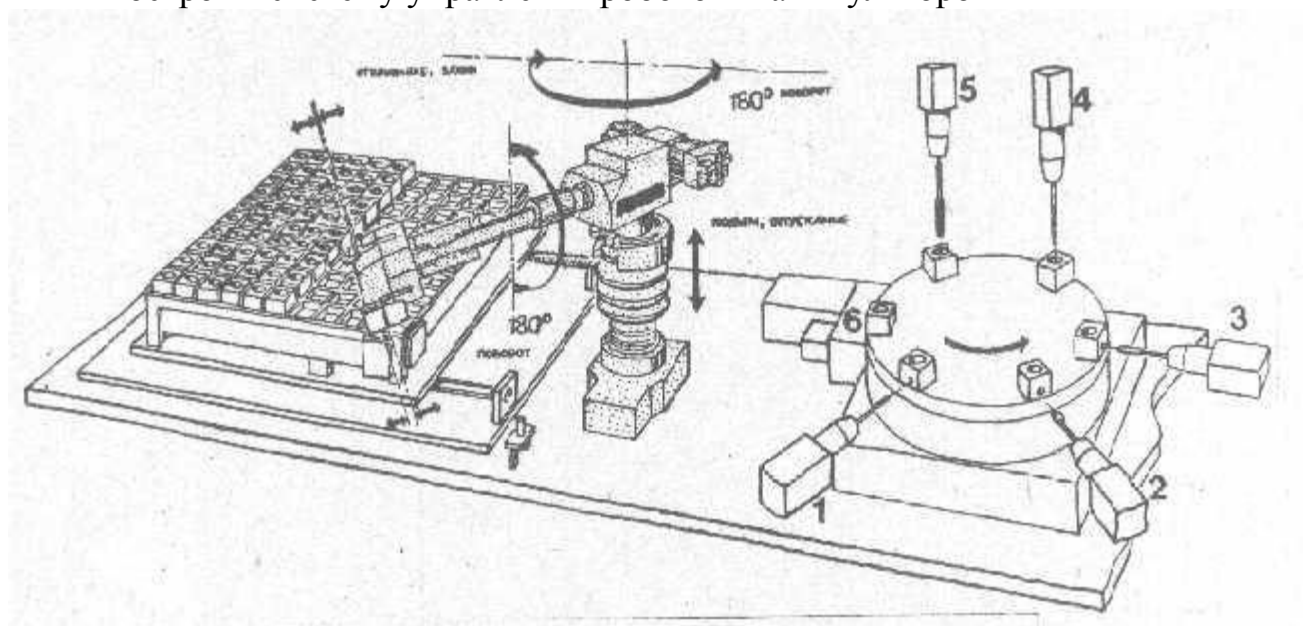
Рассмотрим особенности построения систем автоматического управления с использованием контролера, который содержит процессор сетей Петри.

Входные позиции (P1) непосредственно связаны с датчиками объекта управления, выходные позиции (P2) - с исполнительными механизмами; позиции P3 обеспечивают связь с оператором и взаимодействие с внешними системами управления.

Важным достоинством описываемой технологии является возможность представления как алгоритма управления, так и модели объекта управления сетью Петри, что позволяет выполнить комплексную отладку системы.

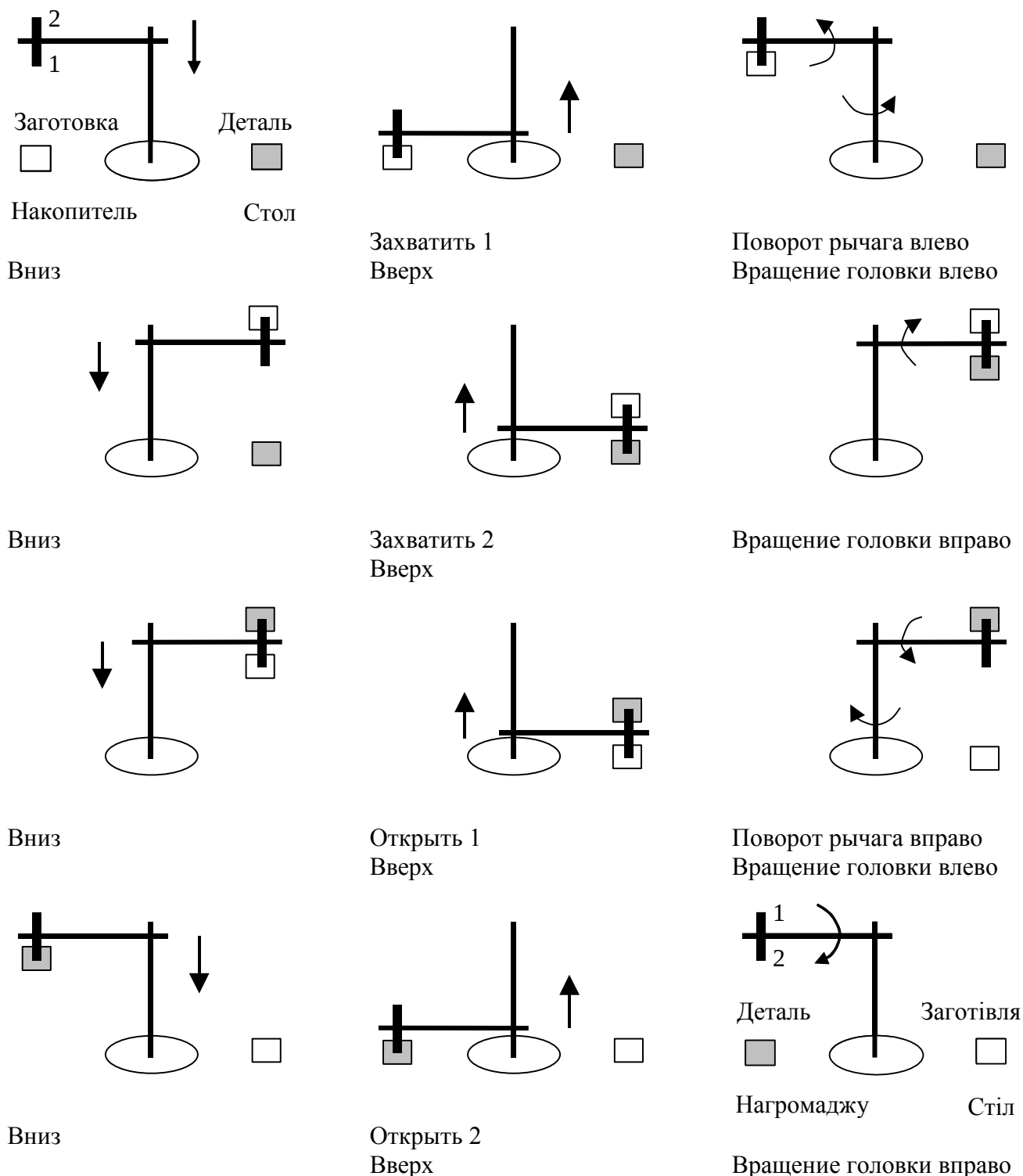


Построим систему управления роботом-манипулятором



Робот взаимодействует с накопителем заготовок/деталей и поворотным столом, на котором выполняется обработка заготовок. Робот состоит из стойки, рычага и головки с двумя захватами. Стойка может подниматься вверх или опускаться вниз; есть два концевых датчика верхнего и нижнего положения стойки; привод выполняет команды поднять стойку и опустить стойку. Рычаг поворачивается на 180 градусов и фиксируется в двух крайних положениях над накопителем и над поворотным столом с помощью концевых датчиков; привод выполняет команды «повернуть влево» и «повернуть вправо». Головка имеет два захвата, расположенных с противоположных ее сторон и может поворачиваться на 180 градусов, фиксируясь в двух крайних положениях с

помощью концевых датчиков; привод выполняет команды «вращать влево» и «вращать вправо». Каждый из захватов может быть открытым или закрытым.

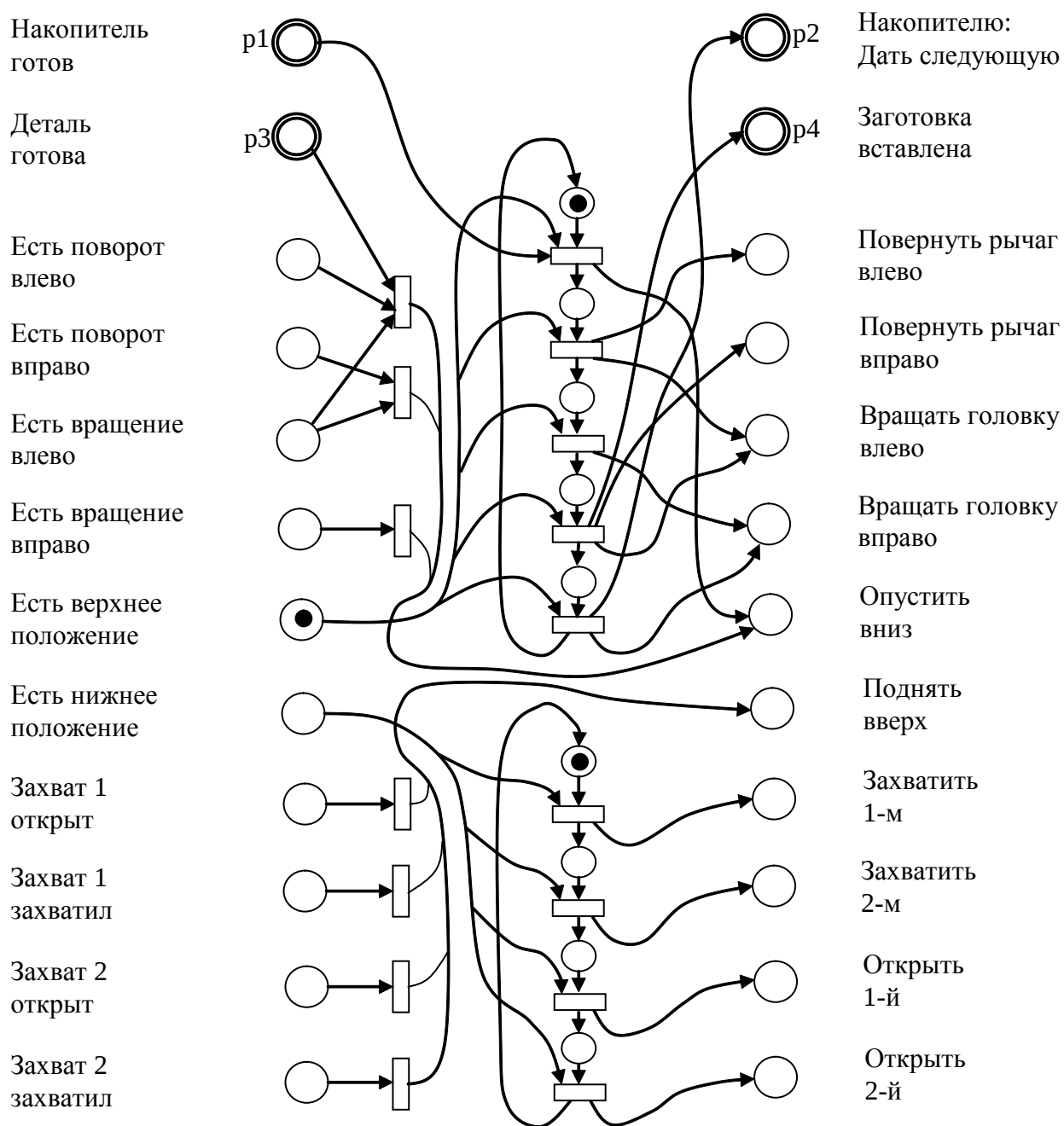


Исходное положение робота - стойка в крайнем верхнем положении, рычаг в крайнем правом положении над накопителем, захват 1 направлен вниз. Основной цикл функционирования работа состоит из последовательности действий: опустить стойку, захватить заготовку, поднять стойку, повернуть рычаг влево и вращать головку влево, опустить стойку, захватить готовую деталь захватом 2, поднять стойку, вращать головку вправо, опустить стойку,

открыть захват 1 для размещения заготовки на поворотном столе, поднять стойку, поворачивать рычаг вправо и вращать головку влево, опустить стойку, открыть захват 2 для размещения детали в накопителе, поднять стойку, вращать головку вправо. Представим описанные действия в виде последовательности пиктограмм.

Накопитель деталей представляет собой прямоугольный ящик с ячейками для заготовок/деталей; перемещение накопителя в двух направлениях обеспечивает размещение необходимой ячейки под правым рабочим положением головки робота. Поворотный стол обеспечивает обработку детали в пяти позициях, а также дополнительную позицию загрузки/разгрузки под левым рабочим положением робота.

Представим модель системы управления роботом



Позиции p_1 , p_2 предназначены для взаимодействия с накопителем, а позиции p_3 , p_4 - для взаимодействия с поворотным столом. В простейшем случае модель объекта может состоять из множества отдельных переходов, которые представляют корректное выполнение команды и срабатывание датчика. Например, для стойки, из перехода, который соединяет исходную позицию «опустить вниз» с входной позицией «есть нижнее положение».

Построенный алгоритм управления следует ввести в среду моделирующей системы Pndpi (Приложение 3.1), отладить автономно и вместе с моделью объекта управления.

Самостоятельно построить модели управления накопителем и поворотным столом. Отладить их автономно и вместе с моделью робота.

Исследовать свойства построенных моделей, доказать корректность алгоритмов управления с помощью системы Tina (Приложение 3.2).

Варианты заданий

Вариант	Размер накопителя		Размер поворотного стола
	ширина	длина	
1	2	4	3
2	3	4	4
3	4	4	5
4	2	3	6
5	2	4	3
6	3	4	4
7	4	4	5
8	2	3	6
9	2	4	3
10	3	4	4
11	4	4	5
12	2	3	6
13	2	4	3
14	3	4	4
15	4	4	5
16	2	3	6

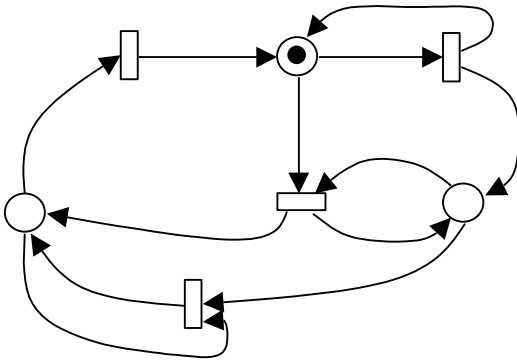
Контрольные вопросы

1. Из каких элементов состоит типичная система автоматического управления?
2. Каким образом осуществляется взаимодействие контролера с объектом управления?
3. В чем заключаются преимущества использования сетей Петри для реализации систем управления?
4. Какими свойствами должен обладать корректный алгоритм управления?

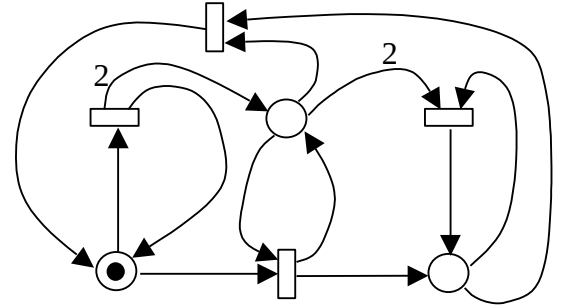
Приложение 1

Набор сетей Петри для исследования

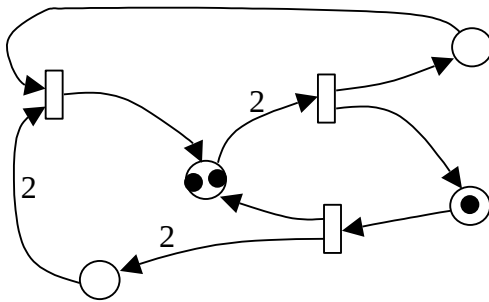
1



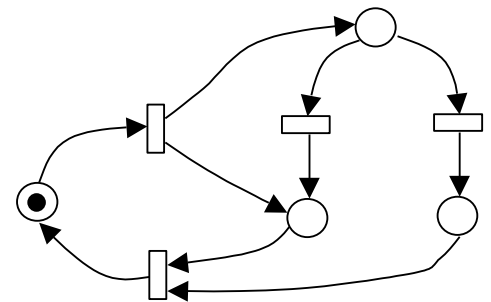
2



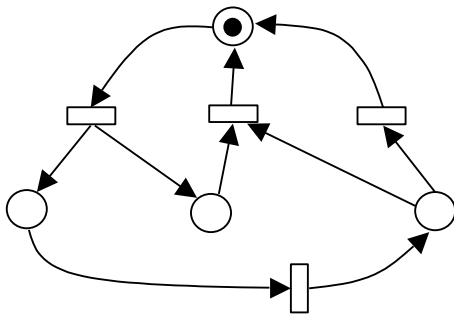
3



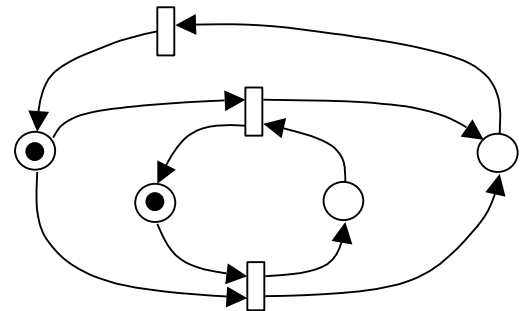
4



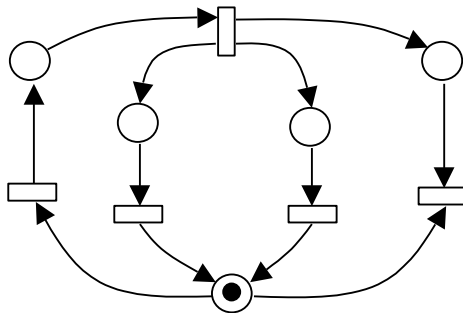
5



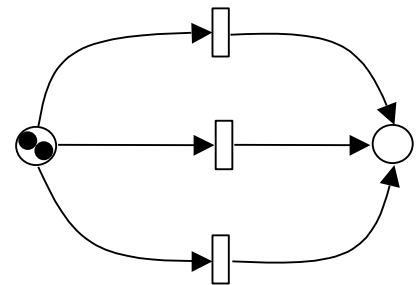
6



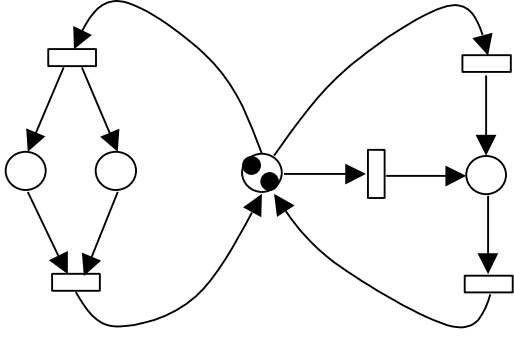
7



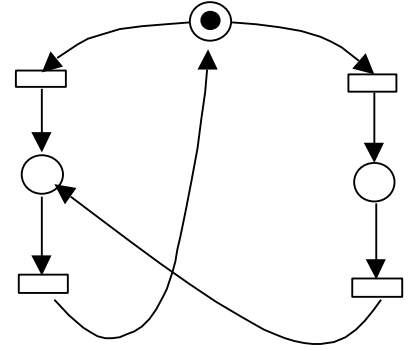
8



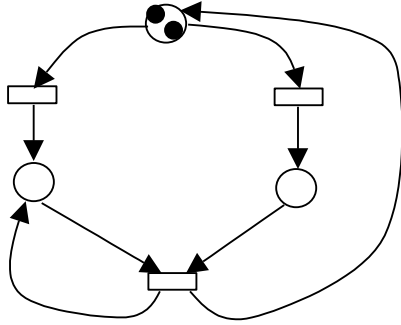
9



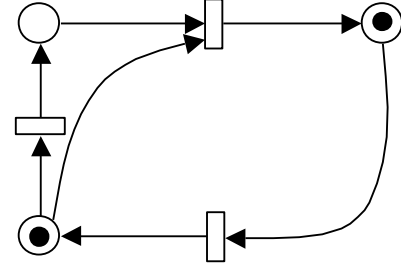
10



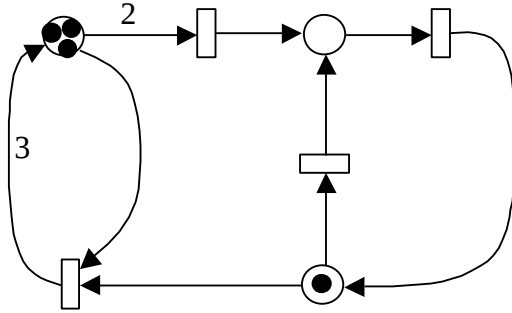
11



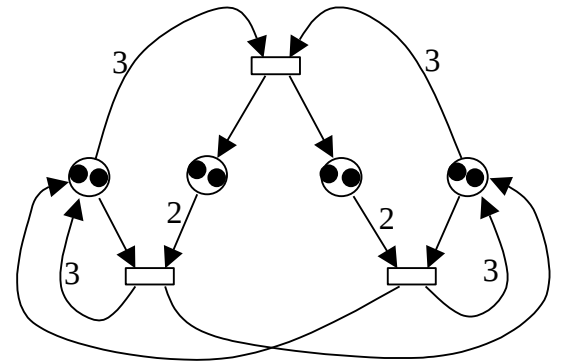
12



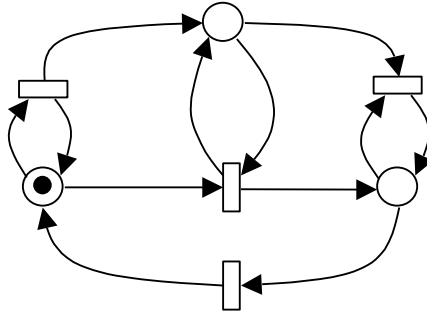
13



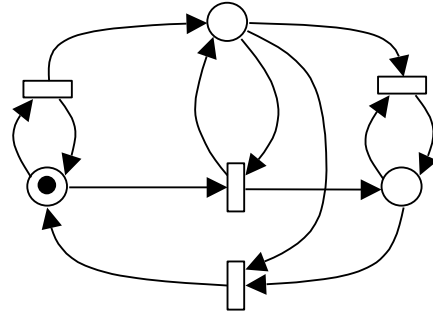
14



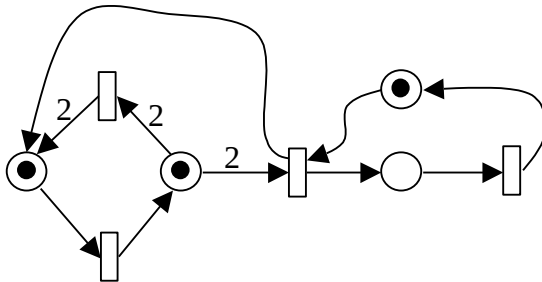
15



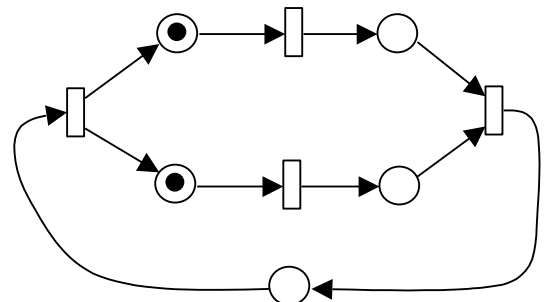
16



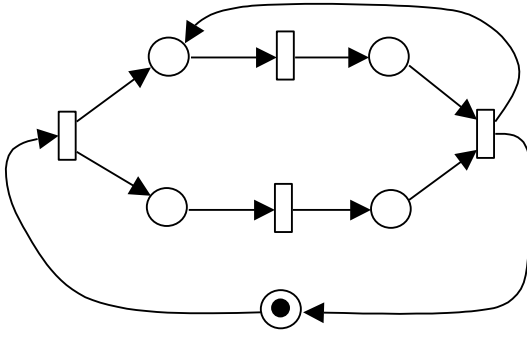
17



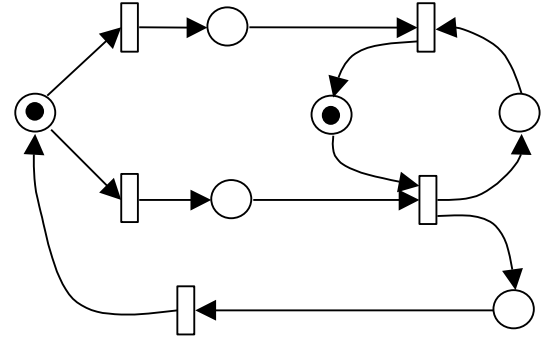
18



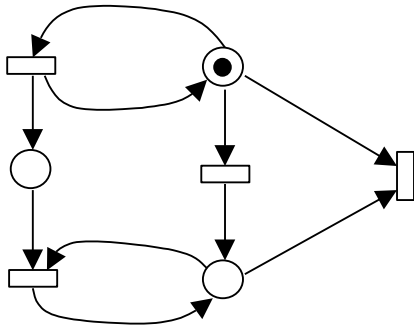
19



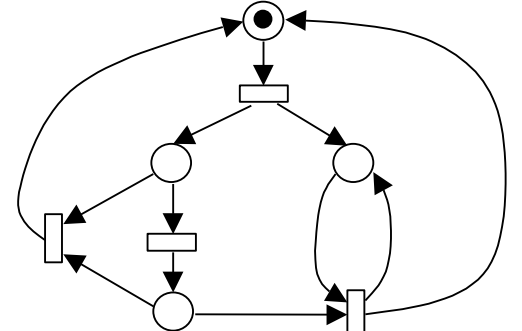
20



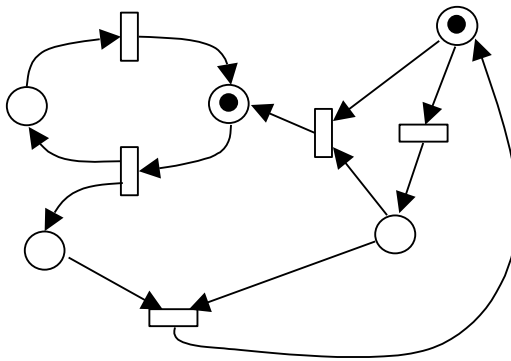
21



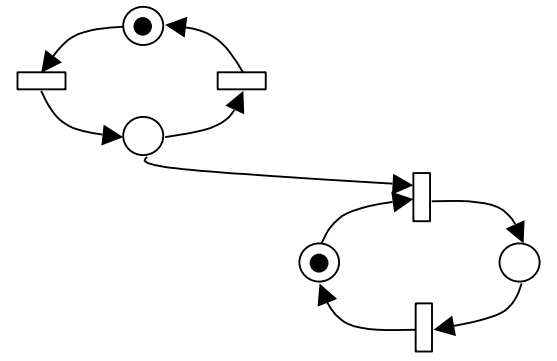
22



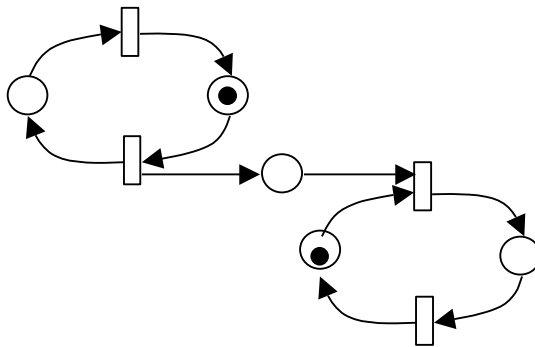
23



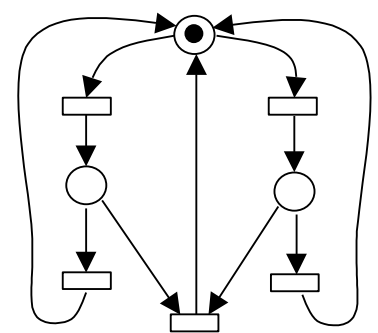
24



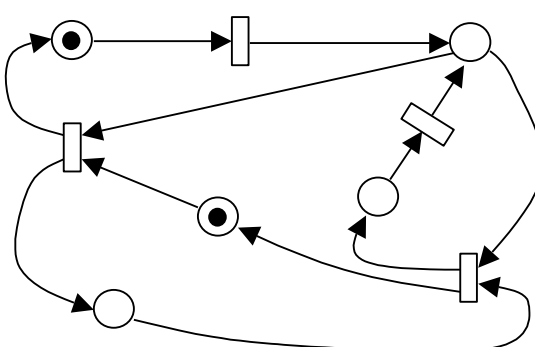
25



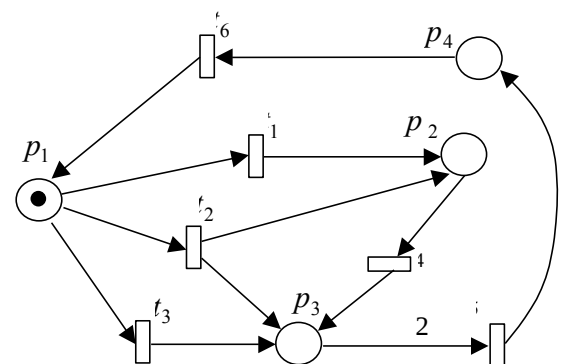
26



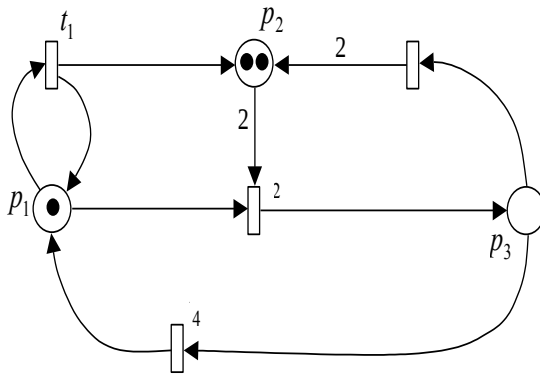
27



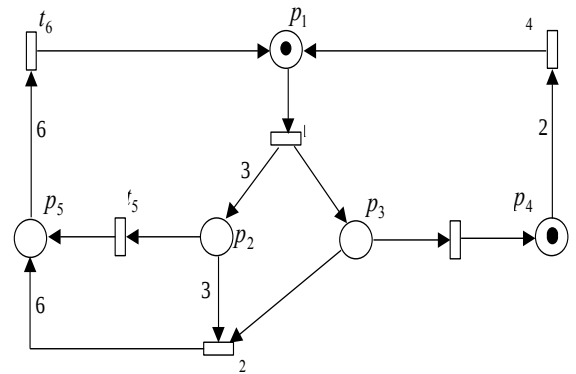
28



29



30



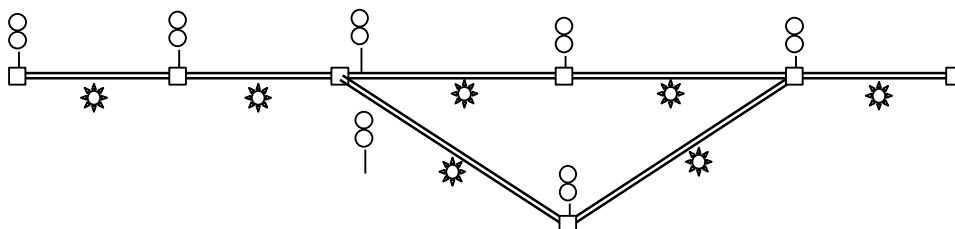
Приложение 2

Индивидуальные задания к построению моделей систем

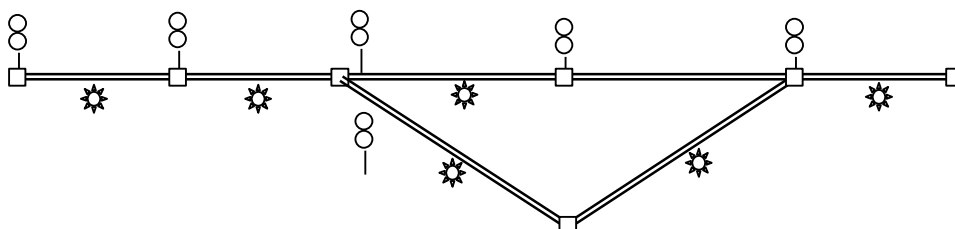
1. Задача об обедающих философях. Пять философов отдыхают в пансионате. Каждый из философов может или предаваться размышлениям, или обедать, посетив столовую. В столовой находится круглый стол, за которым есть места для каждого из философов, пять тарелок, пять вилок, расположенных между тарелками и блюдо спагетти в центре стола. Каждый философ для того чтобы пообедать берет одновременно две вилки и приступает к трапезе, по завершению которой он кладет вилки на стол и предаётся размышлениям.
2. Представить задачу 1 об обедающих философях для случая, когда левую и правую вилки берут поочередно.
3. Представить модель задачи 2 для случая, когда за стол приглашают одного из философов, не препятствующему общему поглощению пищи обедающими.
4. Представить модель задачи 3 для случая, когда приглашение к столу необязательные к рассмотрению философом.
5. Построить модель обслуживания процессов в компьютере, который имеет два процессора, магнитный диск и принтер.
6. Построить модель взаимодействия трех процессов, из которых один пишет сообщения в буфер, а другие два обрабатывают сообщения и помещают результат в выходной буфер.
7. Представить модель задачи 6 при ограничениях на размер буферов.
8. Представить модель задачи 7 для произвольного заданного числа пишущих и читающих процессов.
9. Построить модель лифта для четырехэтажного дома. Кнопки вызова находятся на каждом этаже.
10. Представить модель задачи 9 с ограничениями на количество пассажиров.
11. Построить модель сдачи экзамена группой из четырех студентов одному экзаменатору.

12. Построить модель парикмахерской, в которой работает три парикмахера и есть пять сидячих мест для ожидания клиентов.
13. Представить модель задачи 12 для случая когда клиент, которому не досталось место, может или ожидать стоя, или уйти неподстриженным.
14. Построить модель безопасного движения на участке железной дороги, представленном на схеме. Движение одностороннее. Дорога состоит из перегонов со светофорами (!) и датчиками занятости (*).

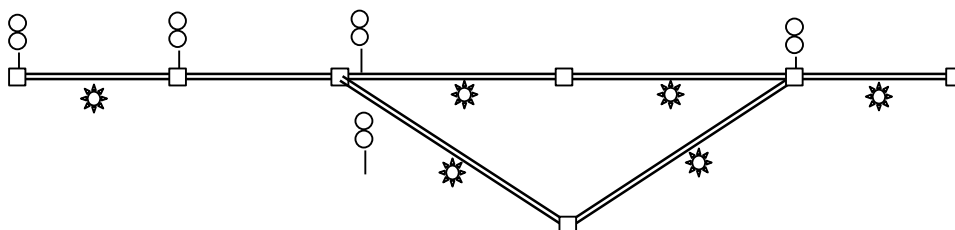
A.



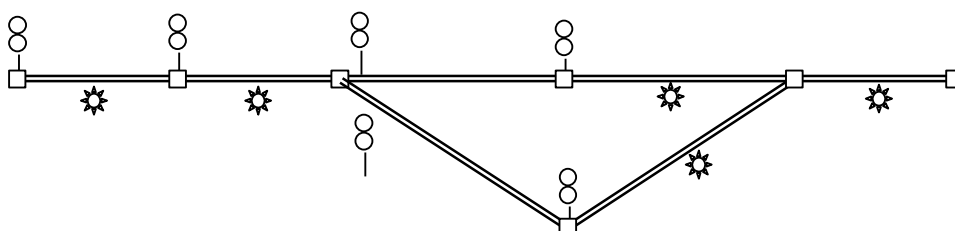
B.



C.



D.



15. Построить модель ядерной реакции, при которой из каждого атома, в который попадает нейтрон, выделяется при распаде восемь нейтронов и образуется новый атом.

Приложение 3

Короткое описание используемых моделирующих систем

Д.3.1. Моделирующая система pndpi

Pndpi - это простейшая инструментальная система для графического ввода, редактирования и имитации динамики базовых сетей Петри. Система разработана в Донецком политехническом институте и является свободно распространяемой.

Pndpi имеет три основных группы функций: файловые, редактирования и имитации.

Файловые функции позволяют загрузить, сохранить или очистить текущую сеть Петри, с которой работает система.

Функции редактирования позволяют выполнять графическое интерактивное построение и модификацию сети. При этом область построения представляет собой лист, покрытый прямоугольной опорной сеткой, в узлах которой могут находиться вершины сети: позиция или переход. Дуги, которые соединяют вершины, также проходят через узлы решетки. Для указания текущего положения на листе служит графический крестообразный курсор. Положение окна изменяется при движении курсора за его границы и отображается в строке состояния в верхней части экрана. Маркировка вводится в строке сообщений в нижней части экрана и отображается в позициях сети. Для удобства графического представления сетей обеспечивается масштабирование изображения.

Функции имитации включают запуск сети в пошаговом и автоматическом режимах. В пошаговом режиме отображаются возбужденные и срабатывающие переходы. При этом можно указать курсором или разрешить автоматический выбор срабатывающего перехода. Автоматический режим может обеспечивать визуализацию динамики.

Система проста в эксплуатации и позволяет освоить основы теории сетей Петри, а также выполнить анализ несложных моделей путем имитации их динамики.

Дальнейшим развитием Pndpi явились системы Невод и Опера-Топаз.

Д.3.2. Моделирующая система Tina

Tina разработанная в лаборатории LAAS в Франции. Система имеет встроенный графический редактор сетей, а также содержит средства автоматического построения рисунка по текстовому описанию сети, а также средства для перемещения элементов сети на рисунке, чтобы сделать наглядным автоматически построенный рисунок.

Основным положительным качеством системы является наличие функций построения дерева достижимых и дерева покрывающих маркировок,

а также средств структурного анализа, основанных на вычислении инвариантов позиций и переходов сети.

Входной файл сети имеет тип .net и в простейшем случае имеет структуру:

```
net <petri net name>
tr <transition name> <list of input places> -> <list of output places>
...
pl <place name> (<initial marking>)
...
```

Для представления кратных дуг после имени позиции указывают символ звездочки и кратность соответствующей дуги.

Набор функций меню Tools позволяет построить дерево достижимых и дерево покрывающих маркировок. И хотя деревья представлены в текстовой форме путем перечисления достижимых (покрывающих) маркировок и дуг, система выполняет автоматический анализ свойств сетей по построенным деревьям.

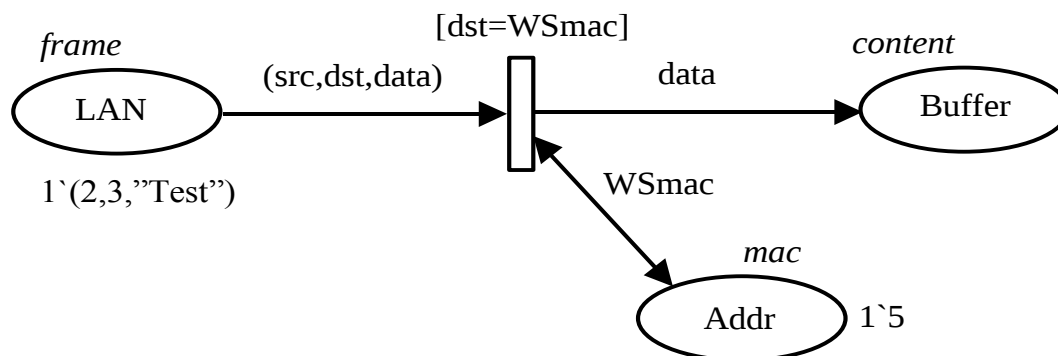
Структурный анализ сети выполняется путем построения и исследования инвариантов позиций и переходов.

Д.3.3. Моделирующая система Design/CPN

Design/CPN разработана в университете Орхуса (Дания). Система функционирует в среде ОС Unix и позволяет строить и исследовать детальные модели реальных объектов, которые содержат сотни тысяч элементов. Design/CPN применена в десятках промышленных проектах, наиболее известными из которых являются проектирования интеллектуальных сетей Deutsche Telekom, проектирование системы управления сетью в RC International A/S, проектирование архитектуры новых мобильных телефонов Nokia, разработка системы безопасности и контроля доступа Dalcotech A/S, планирование операций в военно-воздушных силах США. Лицензия на использование системы Design/CPN в учебных и исследовательских проектах предоставлена университетом Орхуса Одесской национальной академии связи.

Система Design/CPN содержит графический редактор моделей, компилятор языка ML, модуль имитации и модуль анализа. Модель представлена раскрашенной временной иерархической сетью Петри. Предоставляются средства компоновки сложной модели, которая занимает несколько листов, с помощью иерархической схемы, а также средства изображения дополнительных графических и текстовых элементов для повышения наглядности. Язык ML предназначен для описания характеристик элементов сети.

В системе Design/CPN элементы сети кроме индивидуальных имен имеют следующие характеристики: позиция - тип данных хранимых фишек; входная дуга перехода - шаблон для выбора входных фишек; переход - условие запуска в форме предиката; выходная дуга - шаблон для формирования выходных фишек. Далее изображен фрагмент сети, который представляет процесс выбора кадров, направленных к рабочей станции с указанным адресом.



```

color mac = int;
color content = string;
color frame = product mac * mac * content;
var src, dst, WSmac : mac;
var data : content;

```

Для простоты представления адресов рабочих станций использованы целые числа; передаваемые данные представлены символьными строками. Кадр состоит из адреса отправителя, адреса получателя и данных. Выполняется проверка адреса и, в случае совпадения, данные перемещаются в буфер. Наличие фишек в позиции представлено мультимножеством, где числом задается кратность, а затем следует описание фишки. Традиционно типы данных в системе носят название цветов (*color*).

Временные характеристики задаются с помощью выражений вида $@+Delay$, где значение *Delay* определяет временную задержку. В простейшем случае временные задержки могут быть сопоставлены переходам сети. В более сложных ситуациях задерживаются индивидуальные фишки, в этом случае время указывается на выходящих дугах перехода.

Для построения иерархических сетей используется подстановка перехода, при которой переход сети заменяет некоторой подсетью, а также объединение позиций, что позволяет компоновать модель из фрагментов, расположенных на разных листах.

Преемником Design/CPN явилась система CPN Tools.

Список рекомендованной литературы

1. Зайцев Д. А. Математические модели дискретных систем: Учебное пособие // Одесса: ОНАС им. А.С. Попова, 2004. - 40 с.
2. Математические основы теории телекоммуникационных систем / Учебник под общей редакцией В.В. Поповского. - Харьков, ООО «Компания СМІТ», 2006. - 564 с.
3. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. - М. Мир, 1984. - 264 с.
4. Котов В.Э. Сети Петри. - М.: Наука, 1984. - 160 с.
5. Ачасова С.М., Бандман О.Л. Корректность параллельных вычислительных процессов. - Н.: Наука, 1990. - 253 с.
6. Слепцов А.И., Юрасов А.А. Автоматизация проектирования управляющих систем гибких автоматизированных производств / Под ред. Б.Н. Малиновского. - К.: Техніка, 1986. - 160 с.

Структура зачетных модулей

№	Содержание знаний	Учебных часов			
		лекций	практических	самост.	зачет/экз.
1.	Модели дискретных систем	44	22	50/10	зачет
	<i>Содержательные модули:</i>				
	1.1. Конечные автоматы	6	4	10/12	
	1.2. Сети Петри	28	12	30/6	
	1.3. Машины Тьюринга	10	6	10/2	
2.	Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools	22	12	48/8	экзамен
	<i>Содержательные модули:</i>				
	2.1. Основы моделирования в CPN Tools	12	6	26/4	
	2.2. Анализ характеристик сетей в CPN Tools	10	6	22/4	

Содержание содержательных модулей

1.1. Конечные автоматы.

Построение автоматов. Формы представления автоматов. Автоматы Мили и автоматы Мура. Минимизация автоматов.

1.2. Сети Петри.

Элементы сети Петри. Правила срабатывания переходов. Построение моделей систем. Формы представления сетей Петри. Граф достижимых маркировок. Свойства сетей Петри. Исследование свойств с помощью дерева покрывающих маркировок. Фундаментальное уравнение и инварианты. Редукция и декомпозиция сетей Петри. Подклассы и расширения сетей Петри.

1.3. Машины Тьюринга.

Интуитивное понятие алгоритма и необходимость его формализации. Элементы машины Тьюринга. Построение машин Тьюринга. Тезис Чьорча. Универсальная машина Тьюринга. Алгоритмическая неразрешимость проблемы самоприменимости. Метод сведения для доказательства алгоритмической неразрешимости. Элементы теории сложности алгоритмов.

2.1. Основы моделирования в CPN Tools:

Назначение и функции CPN Tools. Организация интерфейса CPN Tools. Инструменты CPN Tools. Язык CPN ML. Атрибуты элементов графа Петра. Имитация динамики сети Петри.

2.2. Анализ характеристик сетей в CPN Tools.

Представление временных характеристик модели. Работа с фрагментами сетей. Построение иерархических моделей. Методы анализа моделей: построение пространства состояний, имитация, измерительные фрагменты. Построение и анализ моделей телекоммуникационных сетей.

Темы практических занятий

№	Тема	Часов
1	Построение конечных автоматов	2
2	Минимизация конечных автоматов	2
3	Построение моделей Петри простых объектов	1
4	Анализ свойств сетей с помощью дерева покрывающих маркировок	2
5	Анализ свойств сетей с помощью фундаментального уравнения и инвариантов	2
6	Анализ свойств сетей с помощью редукции	2
7	Построение порождающего семейства функциональных подсетей	2
8	Построение машин Тьюринга	2
9	Доказательство алгоритмической неразрешимости проблем	2

Темы лабораторных работ

№	Тема	Часов
1	Имитация динамики сетей Петри	1
2	Исследование ограниченности и безопасности сетевых моделей	2
3	Поиск тупиков в моделируемых системах	2
4	Построение и исследования моделей локальных сетей	4
5	Построение и исследования моделей сетевых протоколов	4
6	Построение и исследования моделей систем автоматического управления	4

Литература к изучению модулей

1. Математические основы теории телекоммуникационных систем: Учебник / Под. общ. ред. В.В. Поповского. - Харьков, ООО «Компания СМІТ», 2006. - 564 с.

Модуль 1.2 - раздел 14.1.

Модуль 1.3 - раздел 14.2.

Модуль 1.4 - раздел 14.3.

2. Зайцев Д. А. Математические модели дискретных систем: Учебное пособие / Одесса: ОНАС им. О. С. Попова, 2004. - 40 с.

Модуль 1.2 - раздел 1.

Модуль 1.3 - раздел 2.

Модуль 1.4 - раздел 3.

3. Zaitsev D.A., Shmeleva T.R. Simulating Telecommunication Systems with CPN Tools: Students' book / Odessa: ONAT, 2006. - 60 p.

Модуль 2.1 - разделы 1-6.

Модуль 2.2 - разделы 7-12, приложения.