

## ИМИТАТОР СЕТЕЙ ПЕТРИ И ОПЫТ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

В. Л. Коных (Новосибирск), А. Ю. Михайлишин (Кемерово)

Имитация поведения системы в виде сети Петри все чаще применяется для анализа производственных систем, процессов передачи информации, распределенных вычислительных систем и решения других задач [1]. Сеть Петри представляет собой ориентированный граф с вершинами двух типов: позициями  $P_i$  и переходами  $T_j$ . Вершины соединены дугами. Поведение системы имитируется движением маркеров через переходы от начальной к конечной позициям. Маркеры задерживаются в промежуточных позициях на время выполнения технологических операций. Логику процесса задают правилами движения маркеров через переходы  $T_j$ :

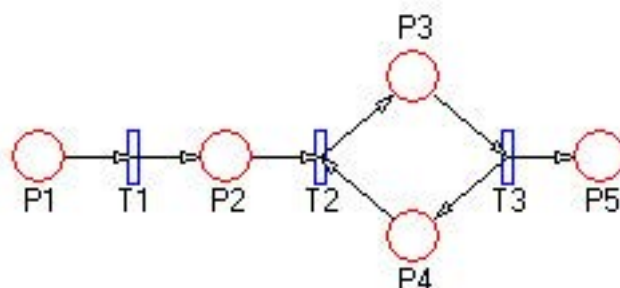


Рис. 1. Имитационная модель работы станка

На рис. 1 показана сеть Петри, имитирующая работу станка. При наличии маркера (заготовки) в позиции  $P_1$  открывается переход  $T_1$  и маркер переходит в позицию  $P_2$  (заготовка во входном накопителе). Если станок настроен на данную операцию (наличие маркера в позиции  $P_4$ ), срабатывает переход  $T_2$  и происходит процесс обработки заготовки на станке ( $P_3$ ). По окончании обработки открывается переход  $T_3$  и деталь поступает в выходной накопитель ( $P_5$ ).

Для ввода сети в компьютер ее структуру задают матрицей инцидентий, вектором приоритетов переходов и матрицей ингибиторных дуг, а параметры – векторами временных задержек маркеров в позициях и начальной маркировки позиций. После компьютерного представления сети проводят имитационные эксперименты с целью выбора структуры и параметров системы.

С 1991 г. разработано восемь версий имитатора сетей Петри. Главным требованием было обеспечение работы с имитатором непрограммирующих пользователей – исследователя системы, технолога или студента. В последней версии NetStar 2.02 возможно построение и редактирование сети Петри [2]. Позиции, переходы и дуги сети переносят из встроенной библиотеки в область построения модели (рис. 2). Их параметры задают в окнах, появляющихся после выбора элемента сети. Предусмотрен ввод текстового комментария к элементу сети. Имитация ведется в режимах фиксированного временного шага и от события к событию.

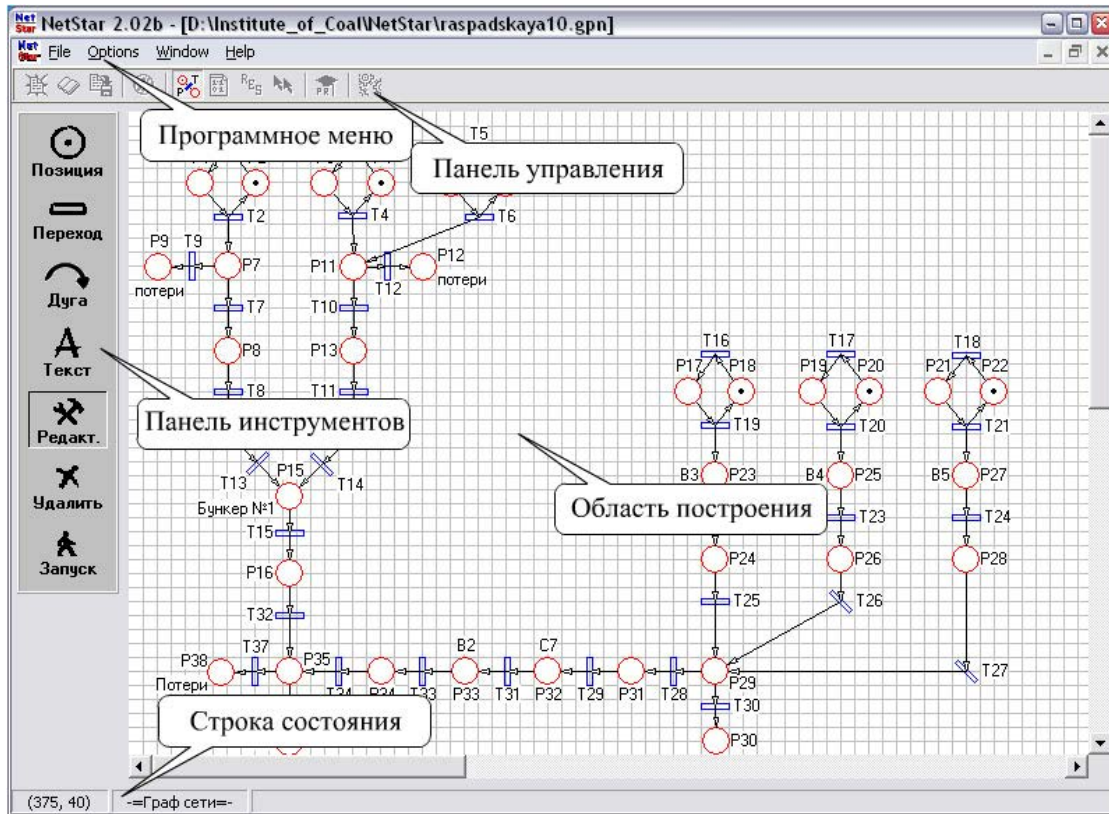


Рис. 2. Построение имитационной модели системы в виде сети Петри

Отредактированная сеть Петри автоматически преобразуется в набор векторов и матриц (рис. 3).

The screenshot displays the data tables for the Petri net model. The interface includes a menu bar, a toolbar, and several data entry fields. The 'Число позиций' (Number of places) is 39 and 'Число переходов' (Number of transitions) is 38. The data tables are as follows:

**Вектор начальной маркировки (Mo)**

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P1
0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0

**Вектор временных задержек маркера в позициях (Mz)**

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P1
1000	0	1000	0	1000	0	0	0	0	0

**Вектор приоритетов переходов (Mpi)**

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T1
1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	1

**Вектор максимальных емкостей (Mo)**

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P
5	1	3	1	3	1	50	5	50	200	50	5

**Матрица инцидентов**

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
P1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
P7	0	1	0	0	0	0	-1	0	-1	0

**Матрица ингибиторных дуг**

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Рис. 3. Компьютерное представление сети Петри

Пользователь задает время и шаг имитации. В результате имитации выводится матрица текущей маркировки, по шагам отображающая перемещение маркеров по позициям сети Петри (рис. 4). Общее время перемещения определяют по номеру шага, на котором маркеры поступают в последнюю позицию сети.

	P30	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	
35,45	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:17	0:205	T32 T35 T37 T36 T38
35,59	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:17	0:205	T2 T1 T7 T8 T13 T15
35,81	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:17	0:206	T32 T35 T37 T36 T38
35,84	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:17	0:207	T32 T35 T37 T36 T38
36,00	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:17	0:208	T21 T18 T24 T27 T28 T29 T31 T33 T34 T35 T37 T36 T38
36,00	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:209	T19 T20 T16 T22 T17 T23 T25 T26 T28 T28 T29 T29 T31 T31
36,06	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:209	T4 T3 T10 T11 T14 T15
36,26	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:209	T4 T3 T10 T11 T14 T15
36,28	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:209	T2 T1 T7 T8 T13
36,32	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:210	T32 T15 T35 T37 T36 T38
36,36	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:210	T2 T1 T7 T8 T13
36,41	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:211	T32 T15 T35 T37 T36 T38
36,59	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:212	T32 T35 T37 T36 T38
36,87	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:212	T2 T1 T7 T8 T13 T15
37,00	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:213	T21 T18 T24 T27 T28 T29 T31 T33 T34 T35 T37 T36 T38
37,06	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:214	T32 T35 T37 T36 T38
37,07	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:214	T2 T1 T7 T8 T13 T15
37,26	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:215	T32 T35 T37 T36 T38
37,32	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:0	0:18	0:216	T32 T35 T37 T36 T38

Рис. 4. Результат имитационного моделирования

С 1993 г. имитатор применяется в учебном процессе КемГУ и КузГТУ, а также в научных исследованиях Института угля Сибирского отделения РАН.

### Учебный процесс

На основе имитатора разработаны лабораторные практикумы по дисциплинам «Основы промышленной робототехники» [3] и «Гибкие производственные системы» [4]. Для работы с имитатором необходимо пройти тестирование и получить допуск к лабораторной работе [5]. С помощью имитатора студенты выбирают структуру роботизированного технологического комплекса (РТК) и гибкой производственной системы (ГПС), определяют характеристики оборудования, отыскивают «узкие места» в технологическом процессе, согласовывают скорости единиц оборудования, оценивают живучесть и производительность РТК и ГПС, анализируют возможность группового обслуживания оборудования, определяют емкости промежуточных накопителей, анализируют работу сборочных линий в толкающем и тянущем («Just-In-Time») режимах, исследуют влияние времени переналадки оборудования на производительность. Выполнение лабораторной работы включает 4 этапа.

#### 1. Построение сети Петри по описанию технологического процесса.

- 1.1. Выбор лабораторной работы.
- 1.2. Словесное описание технологического процесса.
- 1.3. Расчет времени выполнения технологических операций.

- 1.4. Формирование логических условий процесса.
- 1.5. Составление сети Петри.
2. *Ввод имитационной модели в компьютер.*
  - 2.1. Составление матрицы инцидентов.
  - 2.2. Составление матрицы ингибиторных дуг.
  - 2.3. Формирование векторов начальной маркировки, временных задержек и приоритетов переходов.
  - 2.4. Задание времени и шага имитации.
  - 2.5. Ввод структуры и параметров сети в оболочку имитатора.
3. *Проведение имитационных экспериментов.*
  - 3.1. Запуск имитационного моделирования процесса для исходных данных.
  - 3.2. Оценка времени движения маркеров от начальной к конечной позициям.
  - 3.3. Изменение структуры или параметров модели.
4. *Обработка результатов эксперимента.*
  - 4.1. Построение зависимостей технологических показателей от вводимых изменений структуры и параметров оборудования.
  - 4.2. Выбор варианта технологического процесса.
  - 4.3. Время освоения аппарата сетей Петри и работы с имитатором не превышало одного занятия.

#### **Исследование сети подземного конвейерного транспорта [6]**

На крупнейшей российской шахте «Распадская» из 8 рассредоточенных под землей забоев поступают случайные потоки угля. Уголь транспортируется 10 конвейерами к 4 бункерам, откуда двумя конвейерами по наклонному стволу выдается на поверхность. Имитационное моделирование применялось с целью согласования работы забоев и элементов транспортной сети во времени и пространстве. Работа забоев, конвейеров и заполнение бункеров, как одинаковых для любой шахты модулей, отображалась отдельными сетями Петри, которые объединялись в общую сеть Петри, имитирующую работу транспортной сети конкретной шахты. Цель имитационных экспериментов – оценка пропускной способности сети при изменении параметров ее элементов.

#### **Управление подземным конвейерно-локомотивным транспортом [7]**

Проблема заключается в согласовании работы непрерывного и дискретного видов транспорта при случайных потоках угля из четырех забоев. Имитационное моделирование ведется синхронно с реальным транспортированием. Сеть Петри состоит из 50 позиций и переходов. Перед выбором решения диспетчер прогнозирует его последствия, ускоряя имитационное моделирование.

#### **Планирование поставок распределенным потребителям [8]**

Поставщику поступают случайные заявки от распределенных потребителей. Задан минимальный объем отдельной поставки. Необходимо выбрать план поставок, обеспечивающий максимум прибыли поставщика. Результаты имитации планов поставки выводятся на мнемосхему взаимодействия поставщика и потребителей.

#### **Обеспечение отказоустойчивости сборочной линии [9]**

Сборку ведут роботы, размещенные вдоль сборочной линии. При случайном отказе одного из роботов оставшиеся роботы должны перераспределить между собой программу его работы так, чтобы сборка продолжалась. Роботизированная сборочная линия представлена в виде мультиагентной системы. Процессы коллективного поведения роботов при вводе отказа в сборочную линию круговой и линейной компоновок

имитировались сетями Петри с десятками позиций и переходов. В результате имитационных экспериментов найдены зависимости производительности сборочной линии для разных стратегий перераспределения программ.

### **Компоновка оборудования очистного забоя [10]**

Горный инженер вводит в окна мнемосхемы очистного забоя горно-геологические условия и характеристики единиц оборудования, которые могли быть применены в забое. Эти величины автоматически преобразуются в свойства сети Петри и вводятся в имитатор. После имитационного моделирования работы очистного забоя на экран выводится производительность для выбранной совокупности единиц оборудования.

### **Взаимодействие экскаваторов и самосвалов при добыче полезных ископаемых открытым способом [11]**

Распределенные в пространстве экскаваторы разной производительности загружают самосвалы разной грузоподъемности, которые вывозят горную массу на обогатительную фабрику, в отвал или на склад. Время погрузки, рейса и разгрузки случайны. Необходимо найти такое соотношение экскаваторов и самосвалов, при котором не будут образовываться очереди в местах погрузки и разгрузки.

Сеть Петри, введенная в имитатор, содержит 46 позиций и 32 перехода. По окончании имитации на мнемосхему выводятся коэффициенты использования экскаваторов и длины очередей.

### **Кольцевая линия роботизированной сборки [12]**

На учебном макете сборочной линии в Эссенском университете (Германия) четыре робота переносят паллеты с элементами электрических выключателей с кольцевого конвейера на позицию сборки, и после сборки возвращают паллеты на конвейер. Задача состоит в согласовании процессов взаимодействия роботов и конвейера. Имитационная модель разработана в виде сети Петри с 26 позициями и 18 переходами. Результаты моделирования выводятся на анимированную мнемосхему сборки.

Работа выполнялась по гранту Научного Комитета НАТО OUTR CRG № 960628 «Имитация и анимация процессов добычи угля в России» и проекту У0043/995 «Подготовка кадров в области информационных технологий производства для Кузбасса» Федеральной целевой программы «Интеграция науки и высшего образования России на 2002–2006 гг.».

### **Выводы**

1. Разработанный имитатор сетей Петри может применяться в учебном процессе для анализа динамики дискретных систем.
2. С помощью имитатора можно выбирать структуру и параметры производственных систем со сложным взаимодействием дискретных элементов во времени и пространстве.

### **Литература**

1. **Мурата Т.** Сети Петри: свойства, анализ и приложения//Тр. ТИИИЭР/Пер. с англ. – 1989. – Т. 77. – № 4. – С. 41–79.
2. **Михайлишин А. Ю.** Разработка научно-методического обеспечения для имитационного моделирования функционирования сложных систем//“Открытое и дистанционное образование”. Научно-методический журнал, – 2002. – № 4(8). С. 34–35.

3. **Конюх В. Л.** Лабораторный практикум. Основы промышленной робототехники: Методическое и программное обеспечение. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 1994. – 61 с.
4. **Конюх В. Л., Белов Д. В.** Лабораторный практикум по курсу "Гибкие производственные системы": Программно-методическое обеспечение. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 1995. – 47 с.
5. **Конюх В. Л., Телепнев А. С.** Система компьютерного допуска к лабораторным работам по курсам "Основы промышленной робототехники", "Гибкие производственные системы". – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 1996. – 19 с.
6. **Konyukh V., Mikhailishin A.** Simulation of underground transport network//Proc. of the International Carpathian Control Conference (ICCC'2003), Koshice, May 2003.
7. **Konyukh V., Davidenko V., Sturgul J.** Dynamic simulation of mine-wide transport for designing and dispatching//Proc. of the 6-th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. – Czech Republic: Ostrava, Sept.3–6, 1997. – P. 641–646.
8. **Konyukh V., Sinoviev V., Zhdanov Y., Davidenko V.** Mine Simulation and Animation: the Practical Experience//Mechanizacja i Automatyzacja Gornictwa. – 2000. № 4–5 (354). – P. 161–166.
9. **Konyukh V., Ignatiev J.** Fault tolerant assembly line as multi-agent system//Proceedings of 3-rd International Carpathian Control Conference ICCC'2002. – Czech Republic: Malenovice. – P. 457–462.
10. **Конюх В. Л., Гречишкин П.В.** Компоновка оборудования очистного забоя методом имитационного моделирования//Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2004, № 2. С. 77–81.
11. **Конюх В. Л.** Имитация вариантов ведения горного производства на персональном компьютере//Топливо-энергетический комплекс и ресурсы Кузбасса. – 2003. № 2/11. – С. 121—123.
12. **Конюх В. Л., Зиновьев В. В.** Примеры имитации и анимации дискретных систем. CD-ROM. – Кемеровский научный центр СО РАН, 2003.