

УДК 519.711.3

Модификация механизма срабатывания переходов сетей Петри

А.Н. Сочнев*

*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

Received 02.08.2013, received in revised form 04.09.2013, accepted 29.09.2013

В статье представлено описание модифицированного механизма изменения состояния имитационных моделей на основе сетей Петри. Основная идея предлагаемого подхода состоит в создании дополнительной обратной связи по выделенным переменным состояния сетевой модели. Активируемые переходы выбираются на основе анализа значений этих переменных. Предлагается при решении задачи управления изменениями состояний сети Петри использовать нейронные сети. Приведен пример формирования классификатора состояний модели на основе нейронной сети.

Ключевые слова: сеть Петри, система управления, обратная связь, сеть Кохонена.

1. Введение

Процесс эффективного управления сложной системой, как правило, реализуется с применением элементов искусственного интеллекта. Интеллектуальная система управления способна не только решать отдельные задачи в автоматизированном режиме, но и обучаться в процессе управления, строить прогнозы поведения объекта и т.д.

При управлении сложной системой формирование управляющих воздействий может производиться на основе эталонной модели объекта. Эталонная модель большой системы формируется специальными математическими средствами, например с использованием сетей Петри. Соответственно, актуальной является задача дополнения системы управления с эталонной моделью элементами искусственного интеллекта.

Известны различные математические средства модельного представления систем, каждое из которых имеет свои сферы применения, достоинства и недостатки. Для моделирования дискретных систем широко применяется математический аппарат сетей Петри [1]. Среди основных преимуществ сетей Петри можно отметить то, что они позволяют с требуемой точностью представлять ветвящиеся, параллельные, циклические процессы, обладают средствами анализа, а также моделирования в реальном масштабе времени.

Основы теории сетей Петри были заложены в 60-х годах XX века. С тех пор теория сильно разрослась и до сих пор продолжает активно развиваться. Причиной популярности сетей Петри является простота и наглядность описания параллелизма, а также удобное графическое

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: lesek@mail.ru

представление модели. К тому же за время исследований сетей Петри было накоплено большое количество теоретических результатов и практического опыта в области спецификации и анализа параллельных и распределенных систем.

2. Стандартный механизм изменения маркировки сети Петри

Обобщенная сеть Петри формально описывается набором вида [2]

$$R = \{P, T, D, \mu_0\},$$

где $P = \{p_i\}$ – непустое конечное множество позиций, $i = \overline{1, n}$; $T = \{t_j\}$ – непустое конечное множество переходов, $j = \overline{1, m}$; $D = D^+ - D^-$ – отношение инцидентности позиций и переходов; $\mu_0 : P \rightarrow R^+$ – начальная маркировка сети; R^+ – множество целых неотрицательных чисел; n – количество позиций; m – количество переходов.

Матрица инцидентностей позволяет определить уравнение, формирующее механизм изменения маркировки сети:

$$\mu[k + 1] = \mu[k] + D \cdot u[k],$$

где $u[k]$ – вектор-столбец длины m , имеющий единственный ненулевой элемент в позиции j , равный 1 и, соответственно, определяющий, какой из переходов срабатывает на текущем такте управления.

Условие срабатывания переходов сети имеет следующий вид:

$$D^- \cdot u[k] \leq \mu[k].$$

В стандартной сети Петри порядок проверки переходов в приведенном уравнении не определен. Как правило, переходы проверяются по номерам от первого до последнего. Механизм работы обобщенной сети Петри может быть представлен функциональной схемой, приведенной на рис. 1.

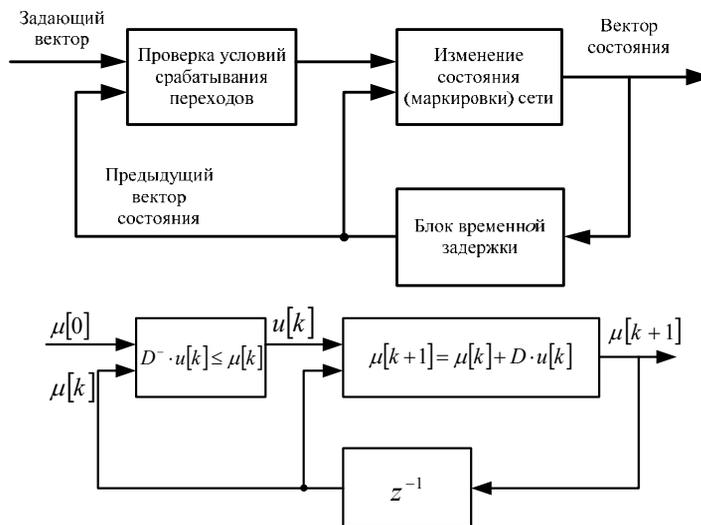


Рис. 1. Схема функционирования обобщенной сети Петри

Как видно, описанный механизм срабатывания переходов никак не учитывает ни критерии оптимальности, ни состояние объекта. Такой метод управления переходами сетевой модели соответствует разомкнутому принципу. В теории управления он считается самым простым и наименее эффективным с точки зрения учета свойств объекта. Теоретически и практически доказано, что его допустимо применять только для простых объектов управления с заранее известными свойствами и предсказуемым поведением.

3. Модифицированный механизм изменения маркировки сети Петри

Очевидным действием по улучшению качества управления является использование сетей Петри с приоритетами переходов [3]. В такой сети порядок срабатывания переходов определяется в соответствии с заранее заданными предпочтениями их выбора (рис. 2).

На рис. 2 функция определения управляющего воздействия на основе приоритетов условно обозначена как $f(u[k], s)$. Приведенная схема, так же как и первая, не предусматривает использования информации о текущем состоянии объекта, т.е. применяет разомкнутый принцип или программное управление. В то же время использование приоритетов в большинстве случаев позволяет оптимизировать функционирование системы по выбранному критерию. Эвристические алгоритмы, использующие приоритетные правила, позволяют найти минимум (максимум) приближенно с неизвестной или очень грубо оцениваемой точностью.

Для того чтобы реализовать систему управления сетью Петри с обратной связью, необходимо в её структуру добавить блок, способный обрабатывать вектор состояния объекта. Такой блок может быть основан на элементах жёсткой логики, нечеткой логики или искусственного интеллекта (рис. 3).

На рис. 3 показана обратная связь, использующая вектор состояния сети Петри $x[k]$. Вектор состояния должен содержать параметры, характеризующие качество работы сети, например маркировку отдельных позиций, количество срабатываний переходов, коэффициенты загрузки переходов и другие требуемые параметры. Формально вектор $x[k]$ может определяться следующим образом:

$$x[k] = (\alpha[k], \beta[k], \gamma[k]).$$

Поясним основные характеристики.

Количество срабатываний каждого перехода

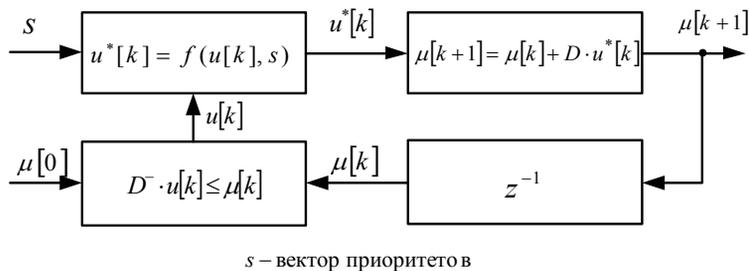


Рис. 2. Схема функционирования сети Петри с приоритетными правилами

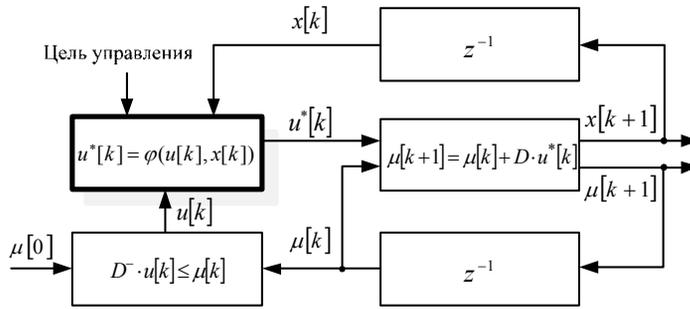


Рис. 3. Схема функционирования сети Петри с обратной связью

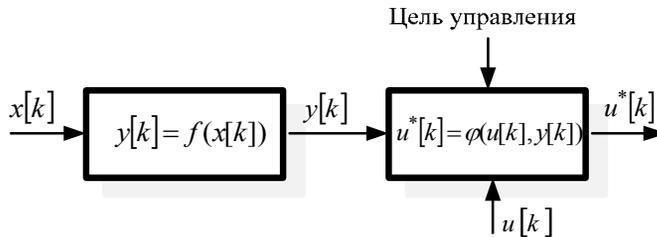


Рис. 4. Схема функционирования сети Петри с обратной связью

$$\alpha_j[k] = \alpha_j[k-1] + 1, \text{ если } u_j^*[k] = 1, j = 1, m.$$

Время суммарной активности каждого перехода

$$\beta_j[k] = \beta_j[k-1] + \delta_j, \text{ если } u_j^*[k] = 1, j = 1, m,$$

где δ_j – время выполнения j -го перехода.

Коэффициент занятости каждого перехода

$$\gamma_j[k] = \frac{\beta_j[k]}{\tau}, j = 1, m, j = 1, m,$$

где τ – модельное время.

Функцию, вырабатывающую управляющее воздействие $u^*[k] = \varphi(u[k], x[k])$, предлагается реализовать с использованием искусственной нейронной сети [4]. На вход сети подается вектор состояния сети $x[k]$ и вектор активных переходов $u[k]$, на выходе формируется вектор срабатывающих переходов $u^*[k]$. Тип нейронной сети выбирается исходя из особенностей задачи.

Произведем декомпозицию функций рассматриваемого блока и выделим две взаимосвязанные задачи: классификацию текущего состояния эталонной модели и собственно выработку управляющего воздействия (рис. 4). Далее приводится пример реализации первого из представленных на рисунке структурных блоков.

4. Объект исследования. Имитационная модель

В качестве объекта исследования рассматривается Учебно-исследовательский гибкий производственный комплекс (УИ ГПК), входящий в структуру Политехнического института ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и предназначенный для обучения

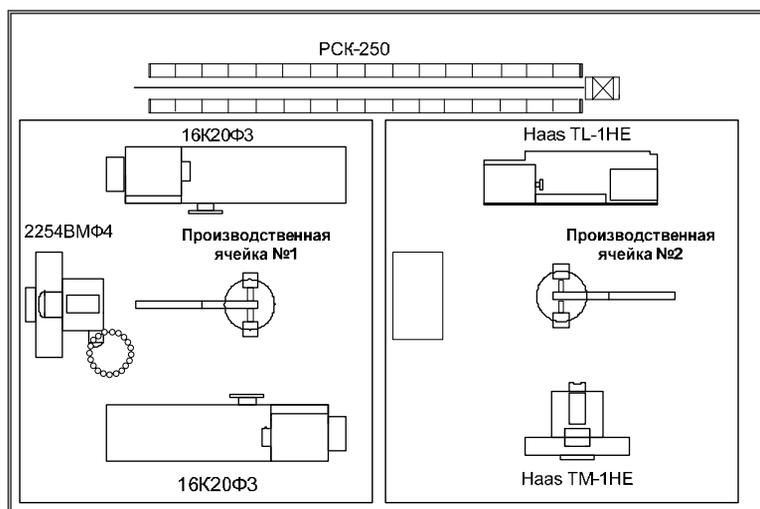


Рис. 5. План размещения оборудования производственной системы (УИ ГПК)

студентов элементам CAD/CAM-технологий, методам автоматизированного управления и программирования устройств числового программного управления (ЧПУ) оборудования. В состав УИ ГПК входят: автоматизированный складской комплекс РСК-250, два токарно-винторезных станка 16К20Ф3 с системой ЧПУ 2Р22, токарный станок Haas TL-1, фрезерный станок Haas ТМ-1 (рис. 5).

Для составления плана-графика производственного процесса задается номенклатура деталей, производимых УИ ГПК. Предусматривается обработка деталей тридцати типов. Время обработки представлено в единицах (тактах), равных 0,01 мин, для упрощения поиска такта времени при моделировании. Задается также и необходимый объем производства каждого вида деталей. Одним деталям требуется только токарная обработка, другим – токарная и фрезерная. Предполагается, что тара с заготовками присутствует в роботизированном складском комплексе. Готовые изделия также направляются в ячейки склада. Приоритет всех изделий установлен одинаковым.

Для формирования плана производственного процесса необходимо предварительно определить возможные траектории перемещения изделий внутри рассматриваемой производственной системы. Все изделия делятся на пять групп по типу требуемой обработки: требующие одну токарную обработку (Т), требующие фрезерную обработку (Ф), требующие одну токарную и затем фрезерную обработку (Т-Ф), требующие токарную обработку с двух установок (Т-Т), требующие токарную обработку с двух установок и затем фрезерную обработку (Т-Т-Ф).

Модель производственной системы формируется на основе временных сетей Петри. Она содержит структурные элементы моделей производственных ячеек № 1 и 2. Эти модели различаются начальной маркировкой позиции, представляющей количество ресурсов типа Т. На рис. 6 представлена сеть Петри с начальной маркировкой. В позициях сети находятся маркеры, моделирующие заготовки изделий определенных выше типов (Т, Ф, Т-Т, Т-Ф, Т-Т-Ф). Доступность каждого ресурса системы – работа, токарного станка и фрезерного станка – моделируется тремя позициями с единичной маркировкой. Входная и выходная позиции каждой ячейки выде-

лены размером позиции. На выходе сети каждой ячейки маркеры всех типов накапливаются в одной позиции. При необходимости модель может быть дополнена выходными позициями для каждого типа изделий. Также перед практическим применением приведенной модели в нее необходимо добавить позиции для выбора маршрутов маркеров в сети.

5. Система классификации состояний модели

Интеллектуальная система управления должна вырабатывать управляющее воздействие в зависимости от состояния объекта. В описываемой системе элементом искусственного интеллекта выступает самообучаемая нейронная сеть Кохонена. Входные нейроны сети воспринимают информацию о текущих значениях коэффициентов загрузки основного технологического оборудования и объеме незавершенного производства каждого типа изделий (Т, Ф, Т-Т, Т-Ф и Т-Т-Ф).

Нейронные сети Кохонена – класс нейронных сетей, основным элементом которых является слой Кохонена. Слой Кохонена состоит из адаптивных линейных сумматоров (линейных формальных нейронов). Как правило, выходные сигналы слоя Кохонена обрабатываются по правилу «победитель забирает всё»: наибольший сигнал превращается в единичный, остальные обращаются в ноль.

Сеть Кохонена состоит всего из двух слоев – входного и выходного. Выходной слой часто называется слой Кохонена. При этом каждый нейрон входного слоя связан со всеми нейронами

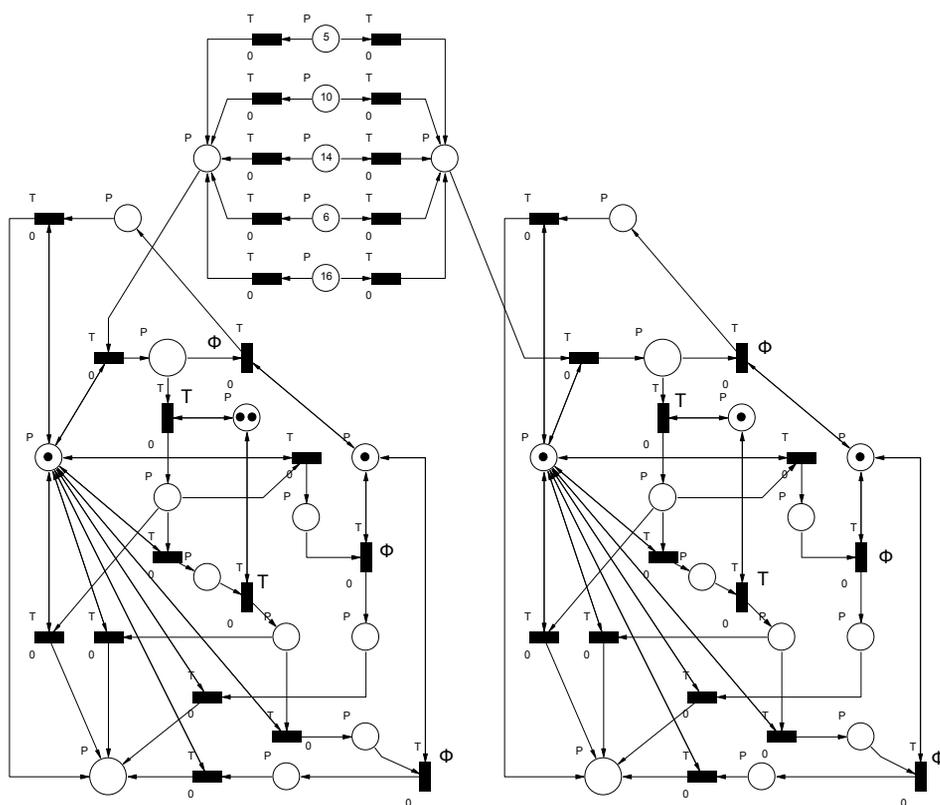


Рис. 6. Сетевая модель производственной системы (УИ ГПК)

выходного, а внутри слоев связей нет. На нейроны входного слоя подаются векторы признаков кластеризуемых объектов.

Создание, обучение и исследование нейросетей осуществляется в пакете Neural Network Toolbox. Листинг программы Matlab представлен ниже. Основные обозначения:

– p – обучающий вектор (p_1, p_2, \dots, p_5 – коэффициенты загрузки соответствующих единиц оборудования, $p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}$ – относительное количество заготовок типа Т, Ф, Т-Т, Т-Ф и Т-Т-Ф соответственно);

– a – тестовый вектор;

– y – выходной вектор нейронной сети.

Листинг программы

```
p=[[0;0.1;0.5;0.2;0.8;0.2;0.1;0.3;0.3;0.1] [0.5;0;0.8;0.3;0.1;0.3;0.5;0.05;0.05;0.1] [0.1;0.3;0.5;0.1;
0.1;0.4;0.2;0.1;0.1;0.2] [0.2;0.4;0.3;0.6;0.2;0.6;0.1;0.1;0.1;0.1] [0.8;0.8;0.2;0.7;0.5;0.3;0.2;0.2;0.1
;0.2] [0.1;0.2;0.1;0.4;0.2;0.5;0.1;0.1;0.2;0.1]];
p%Обучающая выборка
%создание и тестирование нейросети
%построим двумерную самоорганизующуюся карту Кохонена с числом нейронов [2 3]
для классификации входных векторов
netКОН=newsom([0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1;0 1],[2 3]);
netКОН.trainParam.epochs=2000;%максимальное число циклов обучения
netКОН.trainParam.goal=1e-3;%Предельное значение показателя качества
netКОН=train(netКОН,p);
a=[[0;0.8;0.5;0.8;0.8;0.2;0.1;0.2;0.3;0.2] [0.5;0;0.1;0.2;0.4;0.6;0.1;0.1;0.1;0.1] [0.1;0.3;0.8;0.1;0.6
;0.1;0.1;0.4;0.2;0.2] [0.2;0.04;0.1;0.9;0.2;0.2;0.3;0.1;0.2;0.2] [0.8;0.3;0.2;0.7;0.05;0.4;0.2;0.1;0.
2;0.1] [0.2;0.2;0.1;0.2;0.2;0.2;0.4;0.2;0.1;0.1]];
y=sim(netКОН,p);y
y=sim(netКОН,a);y
gensim(netКОН);%синтез сети
plotsom(netКОН.layers{1}.positions)%формирование топологии двумерной карты
Кохонена
%Строим входные векторы
plotsom(netКОН.iw{1,1},netКОН.layers{1}.distances)
```

После выполнения приведенной программы формируется структура сети, производится обучение и создаются структурные модели нейронной сети в пакете Simulink [5] (рис. 7).

Реакция нейронной сети на обучающий вектор:

```
y = (4,1) 1
      (1,2) 1
      (2,3) 1
      (6,4) 1
      (5,5) 1
      (6,6) 1
```

Это говорит о том, что в выходном слое сформировалось шесть нейронов, классов (кластеров), по которым распределились элементы обучающего вектора. К первому нейрону отнесен второй элемент матрицы, ко второму – третий, к третьему – никакой, к четвертому – первый, к пятому – пятый, к шестому было отнесено два схожих элемента – четвертый и шестой.

Реакция сети на тестовый вектор:

- $y = (5,1)$
- $(6,2)$
- $(2,3)$
- $(6,4)$
- $(5,5)$
- $(3,6)$

К первому нейрону не отнесен ни один элемент обучающей матрицы, ко второму – третий, к третьему – шестой, к четвертому – никакой, к пятому – первый и пятый, к шестому – второй и четвертый.

Выходные значения нейронной сети должны интерпретироваться системой управления для формирования управляющих воздействий. Механизмом управления сетью Петри может являться установка приоритетов переходов сети на основе выходного вектора нейронной сети. Это позволит перераспределить потоки маркеров в сети для оптимизации в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

В работе [6] такой механизм реализован с использованием дополнительных позиций сети Петри. В работе [4] в ходе экспериментов подтверждена эффективность использования модифицированного механизма срабатывания переходов сети Петри для оптимизации по выбранному критерию.

6. Заключение

Основные результаты работы можно разделить на теоретические и практические. Теоретическим результатом является разработанная структура системы управления с эталонной

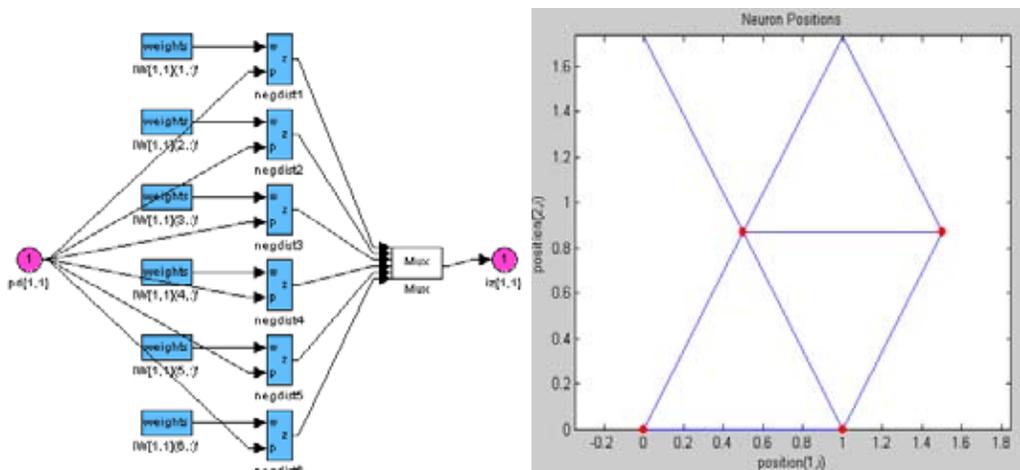


Рис. 7. Структура выходного слоя нейронной сети и карта размещения нейронов

моделью на основе сети Петри, функционирующей в соответствии с модифицированным механизмом срабатывания переходов. Практический результат – разработанная сетевая модель производственного комплекса и нейросетевая система классификации ее состояний.

Для функционирования системы управления необходимо создание и исследование механизма передачи управляющего воздействия с выхода нейронной сети на элементы сети Петри. Это задача для дальнейших исследований.

Список литературы

- [1] Емельянов, В.В., Горнев В.Ф., Овсянников М.В. Оперативное управление в ГПС. М.: Машиностроение, 1990. 256 с.
- [2] Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 160 с.
- [3] Макаров И.М., Рахманкулов В.З., Назаретов В.М. и др. Робототехника и гибкие автоматизированные производства: в 9 кн. Кн. 5. Моделирование робототехнических систем и гибких автоматизированных производств: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1986. 175 с.
- [4] Сочнев А.Н. // Управление большими системами. М.: ИПУ РАН, 2011. Вып. 33. С. 198-217.
- [5] Чен К., Джиблин П., Ирвинг А.. Matlab в математических исследованиях. М: Мир, 2001. 346 с.
- [6] Сочнев А.Н. // Журнал СФУ. Сер. «Техника и технологии». 3 (2010 3) 356-368.

Modification of the Petri Nets Transition Firing Mechanism

Alexey N. Sochnev
*Siberian Federal University,
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

The article describes a modified mechanism of state changes in the simulation models based on Petri nets. The basic idea is to provide additional feedback on the selected state variables network model. Activated transitions are selected based on the analysis values of these variables. It is proposed to solve the problem management of change states Petri nets by using a neural network. An example of generating the classifier based on the states of the model of the neural network.

Keywords: Petri nets, control system, feedback, Kohonen network.
