УДК 519.95

М.А. Ахмедов, д-р техн. наук,
В.А. Мустафаев, канд. техн. наук
Сумгаитский госуниверситет
(Азербайджан, Az 5000, Сумгаит, ул. Бакинская, 1,
тел: (+994 18 64) 82828, e-mail: valex-sdu@mail.ru)

Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением стохастических и нечетких сетей Петри

Рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов, описывающих функционирование сложных объектов в условиях неопределенности. Модели динамических процессов представлены в виде стохастических и нечетких сетей Петри. На примере гибкого производственного модуля нанесения рисунка показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью описывают процесс функционирования стохастических сетей Петри.

Розглянуто моделювання динамічних взаємодіючих процесів, які описують функціонування складних об'єктів в умовах невизначеності. Моделі динамічних процесів подано у вигляді стохастичних і нечітких сіток Петрі. На прикладі гнучкого виробничого модуля нанесення малюнка показано, що прийняті правила спрацьовування переходів повністю описують процес функціонування стохастичних сіток Петрі.

К л ю ч е в ы е с л о в а: продукционная модель, сети Петри, гибкий производственный модуль.

Постановка задачи. Одной из актуальных задач теории систем является исследование динамических взаимодействующих процессов, происходящих в условиях неопределенности. Трудности, связанные с решением этой проблемы, зависят от ряда факторов, к которым следует отнести, в первую очередь, следующие:

наличие большого числа взаимосвязанных элементов со сложными структурными и функциональными отношениями между ними;

функционирование отдельных элементов не является самостоятельным и обусловлено их местом в системе в целом;

функционирование отдельных элементов происходит асинхронно, правила взаимодействия их описываются сложными логическими условиями;

неопределенность поведения отдельных элементов может носить как вероятностный, так и нечеткий характер.

В связи с указанными трудностями требуется разработка нового подхода к моделированию поведения систем и процессов в условиях неопределенности. Основой для такого подхода стали конструкции сетей Петри (СП) и дальнейшее развитие алгебраических сетей, которые позволяют с заданной точностью описывать взаимодействующие асинхронные процессы. Одно из возможных обобщений СП связано с реализацией в них дополнительных свойств, позволяющих описывать неопределенность поведения систем в процессе их функционирования. Существует два подхода к решению данной проблемы.

Первый подход состоит в описании неопределенности срабатывания переходов, находящихся в состоянии конфликта. При этом множество разрешенных последовательностей переходов принимается за полную группу событий и каждому элементу множества приписывается некоторая вероятность. Недостаток этого подхода — необходимость анализа большого числа элементов, множество разрешенных последовательностей переходов и резкое их возрастание при расширении сети.

Второй подход связан с учетом неопределенности числа фишек в позициях сети, моделирующих состояние отдельных элементов системы. Число фишек во всех позициях определяет глобальное состояние системы. При этом следует заметить, что неопределенность наличия фишек может быть описана как с вероятностных позиций, так и с позиций теории нечетких множеств. Данная задача в процессе моделирования систем решается с помощью стохастических и нечетких СП.

Будем рассматривать моделирование динамических взаимодействующих процессов, происходящих в условиях неопределенности, с применением стохастических и нечетких СП.

Представление динамических взаимодействующих процессов нечеткими моделями. Особенность нечетких моделей [1] состоит в том, что они должны обеспечивать гибкую стратегию обработки разнородных динамических взаимодействующих процессов, которые представляют данные и знания в существенно нечетком пространстве состояний объектов анализа. Динамические взаимодействующие процессы описывают числовыми и лингвистическими переменными. В связи с этим нечеткие модели ориентированы на моделирование конструкций, для которых характерно следующее: функционирование на уровне лингвистических термов (нечетких множеств); характеристики системы могут быть изображены в том же лингвистическом формате; представление и обработка данных в условиях неопределенности.

Нечеткие модели, основанные на правилах вычисления с нечеткими множествами, являются наглядным и эффективным средством представления взаимодействующих динамических процессов, отображающих данные и знания в виде «if ..., then...». Часть правила «if» называется посылкой, а «then» — выводом или действием. В общем виде под продукцией понимают выражение (Y); Q; X; $A \Rightarrow B$; s, где Y — имя продукции; Q — характеристика сферы применения продукции; X — условие применимости ядра продукции; A — условие; B — вывод или действие; $A \Rightarrow B$ — ядро продукции; s —постусловие продукции. В реальных конструкциях ядра составляющая A имеет сложную структуру, включающую некоторые предикаты, логические операции типа not, and, or и их производные.

В состав продукционной системы [2] входит следующее: база правил; глобальная база данных; интерпретатор правил. База правил — это область памяти, содержащая базу знаний, т.е. совокупность знаний, представленных в форме правил вида «if ..., then ...» .

Глобальная база данных — это область памяти, содержащая фактические данные, которые описывают вводимые данные и состояние системы. Базы данных у различных систем имеют различную форму, однако все они могут быть описаны как группа данных, содержащих имя данных, атрибуты и значения атрибутов. Интерпретатор представляет собой механизм вывода компонент системы, формирующий заключение, используя базу правил и базу данных.

Рассмотрим структуру правила продукции в четком представлении знаний:

$$\text{if} \quad A_1 \ \text{and} \ A_2 \ \text{and} \ \ldots \ \text{and} \ A_n \ \text{then} \ B. \qquad (1)$$

Такая запись означает, что если все условия от A_1 до A_n являются истиной, то B также истина, или когда все условия от A_1 до A_n становятся истиной, то следует выполнить действие B. Выражение (1) на языке булевой логики имеет вид

$$\text{B} = \text{true} \mid (A_1 \ \text{and} \ A_2 \ \text{and} \ \ldots \ \text{and} \ A_n) = \text{true}. \qquad (2)$$

Аналогично (1), (2) можно показать справедливость соответствующих решений для правил продукций, содержащих операции not, or и их производные. Выражения (1), (2) в нечетком представлении имеют вид

$$\text{if} \ \overline{A_1} \ \text{is} \ \mu_{\overline{A_1}}(x) \ \text{and} \ \overline{A_2} \ \text{is} \ \mu_{\overline{A_2}}(x) \ \text{and} \ldots \text{and} \ \overline{A_n} \ \text{is} \ \mu_{\overline{A_n}}(x) \ \text{then} \ \overline{B} \ \text{is} \ \mu_{\overline{B}}(x),$$

$$\overline{B} = \text{true} \mid [(\overline{A_1} \ \text{and} \ \overline{A_2} \ \text{and} \ldots \text{and} \ \overline{A_n}) = \text{true}] \ \text{and} \ldots$$

$$\ldots \text{and} \ [\mu_{\overline{A_1}}(x_1) \geq \mu_{\overline{A_1}}(x_1)^*] \ \text{and} \ [\mu_{\overline{A_2}}(x_1) \geq \mu_{\overline{A_2}}(x_1)^*] \ \text{and} \ldots$$

$$\ldots \text{and} \ [\mu_{\overline{A_n}}(x_1) \geq \mu_{\overline{A_n}}(x_1)^*] \ \text{and} \ [\mu_{\overline{B}}(x_1) \geq \mu_{\overline{B}}(x_1)^*],$$

где $\overline{A_1}, \overline{A_2}, ..., \overline{A_n}$ — нечеткое условие; $\overline{B}$ — нечеткий вывод или действие; $\mu_{\overline{A_1}}(x_1)^*$, $\mu_{\overline{A_2}}(x_1)^*$, ..., $\mu_{\overline{A_n}}(x_1)^*$, $\mu_{\overline{B}}(x_1)^*$ — допустимые значения соответствующих функций принадлежности. Функции принадлежности множества процессов, определяющие условия и действия предметной области, отображаются на множестве позиций и переходов стохастических или нечетких СП.

С учетом изложенного нечеткую продукционную модель динамических взаимодействующих параллельных процессов можно представить в виде стохастических СП: $N=(P,T,I,O,\mu)$, где $P=\{p_i\}$ ($i=1, \ldots, n$; n — число позиций) — конечное непустое множество позиций; $T=\{t_j\}$ ($j=1, \ldots, m$; m — число переходов) — конечное непустое множество переходов; $I: P\times T \to (0, 1, ...)$ и $O: T\times P \to (0, 1, ...)$ — соответственно функции входных и выходных инциденций. Отображение $\mu: P \to [0, 1]$ присваивает каждой позиции p_i вектор распределения вероятностей фишек на позиции $\mu(p_i)$.

Рассмотрим представление взаимодействующих процессов для следующих случаев:

1. Процесс выполняется при наличии одного или более входных и одного или более выходных условий: $\exists\, t_j \in T, [|I(p_i)| \geq 1]$ and $[|O(p_i)| \geq 1]$.

2. Некоторое условие выполнения процесса имеет один или более входных и один или более выходных процессов: $\exists\, p_i \in P, [|I(t_j)| \geq 1]$ and $[|O(t_j)| \geq 1]$.

3. Процесс выполняется при наличии более одного входного условия и более одного выходного условия: $\exists\, t_j \in T, [|I(p_i)| > 1]$ and $[|O(p_i)| > 1]$.

4. Некоторое условие выполнения процесса имеет более одного входного и более одного выходного процесса: $\exists\, p_i \in P, [|I(t_j)| > 1]$ and $[|O(t_j)| > 1]$.

Алгоритм функционирования стохастических СП. При решении практических задач удобно использовать матричное представление структуры стохастических СП. Элементы матриц входных f_{ij}, выходных h_{ij} позиций и инциденций d_{ij} определяются так:

$$f_{ij} = \begin{cases} 1, \text{if}\, p_i \in I(t_j), \\ 0, \text{if}\, p_i \notin I(t_j), \end{cases} \quad h_{ij} = \begin{cases} 1, \text{if}\, p_i \in O(t_j), \\ 0, \text{if}\, p_i \notin O(t_j), \end{cases}$$

$$d_{ij} = \begin{cases} -1, \ \text{if}\, p_i \in I(t_j),\ p_i \notin O(t_j), \\ \ \ 1, \ \text{if}\, p_i \notin I(t_j),\ p_i \in O(t_j), \\ \ \ 0, \ \text{if}\, p_i \notin I(t_j),\ p_i \notin O(t_j). \end{cases}$$

Срабатывание переходов и изменение состояний стохастических СП определяются следующими правилами [3]:

если вектор распределения вероятностей каждой входной позиции $p_i \in P$ имеет компоненту, не равную нулю, с номером, равным или большим числа дуг, соединяющих данную позицию с переходом $t_j \in T$, то срабатывает переход t_j;

после срабатывания перехода происходит процесс перераспределения фишек в позициях;

число фишек в позициях определяет состояние сети.

Переход t_j при маркировке μ разрешен при следующих условиях:

выбираются все $f_{ij} \neq 0$ при $i = \overline{1, n}$;

для каждого фиксированного i

$$\sum_{k=f_{ij}}^{k_i} \mu_{ik} \neq 0,$$

где k_i — длина вектора распределения вероятностей i-й позиции.

После срабатывания перехода t_j перераспределение фишек по позициям и новую маркировку определяют по следующему алгоритму:

1. Формируют вектор распределения вероятностей каждой входной позиции после срабатывания перехода t_j.

1.1. Вычисляют нулевой компонент вектора распределения вероятностей

$$\mu'_{i0} = \sum_{\alpha=0}^{f_{ij}} \mu_{i\alpha} .$$

1.2. Определяют остальные компоненты вектора распределения вероятностей: $\mu_{i\beta} = \mu_{i\beta} + f_{ij}$, $\beta = 1, 2, \ldots, k_i - f_{ij}$.

1.3. При запуске перехода t_j размерность вектора распределения вероятностей каждой входной позиции уменьшается на число входных дуг: $k_i = k_i - f_{ij}$.

2. Формируют вектор распределения вероятностей каждой выходной позиции после срабатывания перехода. Этот вектор равен вектору диагональной свертки матрицы Грама исходного выходного вектора и промежуточного вектора $r = (r_0, r_1, \ldots, r_{\underline{hjz}})$.

2.1. Выбирают все $h_{jz} \neq 0$ при $z = \overline{1, n}$.

2.2. Вычисляют последнюю компоненту вектора r для всех фиксированных i при $f_{ij} \neq 0$:

$$r_{h_{jz}} = \prod_{i} \sum_{\alpha=f_{ij}}^{k_i-1} \mu_{i\alpha} .$$

2.3. Рассчитывают нулевой компонент: $r_0 = 1 - r_{h_{jz}}$.

2.4. Определяют остальные компоненты: $r_i = 0$, $i = \overline{1, h_{jz} - 1}$.

3. Формируют матрицу Грама векторов μ_z и r^{T} (Т — знак транспонирования):

$$G(\mu_z, r^{\mathrm{T}}) = (\mu_{z0}\ \mu_{z1}\ \dots\ \mu_{zk_z}) \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_{h_{jz}} \end{pmatrix} = \left| \begin{matrix} \mu_{z0} \cdot r_0\ \mu_{z0} \cdot r_1 \dots \mu_{z0} \cdot r_{h_{jz}} \\ \mu_{z1} \cdot r_0\ \mu_{z1} \cdot r_1 \dots \mu_{z1} \cdot r_{h_{jz}} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \mu_{zk_z} \cdot r_0\ \mu_{zk_z} \cdot r_1 \dots \mu_{zk_z} \cdot r_{h_{jz}} \end{matrix} \right|,$$

где $g_{\ell k} = \mu_{z\ell} \cdot r_k$, $\ell = \overline{0, k_z}$, $k = \overline{0, h_{jz}}$.

4. Вычисляют вектор диагональной свертки матрицы Грама $C\,(G\,(\mu_z, r^{\mathrm{T}}))$:

$$C(G(\mu_z, r^{\mathrm{T}})) = \left| \begin{matrix} (\mu_{z0} \cdot r_0) \\ (\mu_{z1} \cdot r_0) + (\mu_{z0} \cdot r_1) \\ \dots\dots\dots \\ (\mu_{zk_z} \cdot r_0) + (\mu_{zk_{z-1}} \cdot r_1) + \dots + (\mu_{z-h_{jz}} \cdot r_{h_{jz}}) \\ \dots\dots\dots \\ (\mu_{zk_z} \cdot r_{h_{jz}}) \end{matrix} \right|.$$

Элементы этого вектора рассчитывают по формуле

$$c_\ell = \sum_{k+i=\ell} (\mu_{zk} \cdot r_i), \quad k = \overline{0, k_z}, \quad i = \overline{1, h_{jz}}.$$

Размерность вектора распределения вероятностей увеличивается на число h_{jz}: $k_z = k_z + h_{jz}$.

5. Формируют вектор $\mu'_z = (\mu'_{z0}\ \mu'_{z1} \dots \mu'_{kz})$ распределения вероятностей выходной позиции p_z : $\mu'_{zk} = c_k$, $k = \overline{0, k_z}$.

Алгоритм функционирования нечетких СП. Нечеткой СП называется пятерка $N = (P, T, I, O, \mu)$, где P и T — нечеткие множества позиций и переходов; $I : P \times T \to (0, 1, \dots)$ и $O : T \times P \to (0, 1, \dots)$ — функции соответственно входных и выходных инциденций. Отображение μ: $P \to [0, 1]$ присваивает каждой позиции p_i вектор распределения степеней принадлежности фишек к позиции $\mu\,(p_i)$.

Срабатывание переходов и изменение состояний нечетких СП определяются следующими правилами.

Если вектор распределения степеней принадлежности каждой входной позиции $p_i \in P$ имеет компоненту, не равную нулю, с номером, равным или большим числа дуг, соединяющих данную позицию с переходом $t_j \in T$, то срабатывает переход t_j; после срабатывания перехода происходит процесс перераспределения фишек в позициях.

ISSN 0204–3572. Electronic Modeling. 2013. V. 35. № 4

Число фишек в позициях определяет состояние сети.

Переход t_j при маркировке μ разрешен, при условиях: выбираются все $f_{ij} \neq 0$ при $i = 1, n$; для каждого фиксированного i $\exists$ $\mu_{ik} \neq 0$ при $k = \overline{f_{ij}, k_i}$, где k_i —длина вектора распределения степеней принадлежности i-й позиции.

После срабатывания перехода t_j перераспределение фишек по позициям и новую маркировку определяют по следующему алгоритму:

1. Формируют вектор распределения степеней принадлежности каждой входной позиции после срабатывания перехода t_j.

1.1. Вычисляют нулевой компонент вектора распределения степеней принадлежности

$$\mu'_{i0} = \bigvee_{\alpha=0}^{f_{ij}} \mu_{i\alpha} ,$$

где $\vee$ — операция логического максимума.

1.2. Определяют остальные компоненты вектора распределения степеней принадлежности: $\mu_{i\beta} = \mu_{i\beta} + f_{ij}, \beta = 1, 2, ..., k_i - f_{ij}$.

1.3. При запуске перехода t_j размерность вектора распределения степеней принадлежности каждой входной позиции уменьшается на число входных дуг: $k_i = k_i - f_{ij}$.

2. Формируют вектор распределения степеней принадлежности каждой выходной позиции после срабатывания перехода. Этот вектор равен вектору диагональной свертки матрицы Грама исходного выходного вектора и промежуточного вектора $r = (r_0, r_1, \dots, r_{hjz})$.

2.1. Выбирают все $h_{jz} \neq 0$ при $z = \overline{1, n}$.

2.2. Вычисляют последнюю компоненту вектора r для всех фиксированных i при $f_{ij} \neq 0$:

$$r_{h_{jz}} = \bigwedge_i \bigvee_{\alpha=f_{ij}}^{k_i-1} \mu_{i\alpha} ,$$

где $\wedge$ — операция логического минимума.

2.3. Рассчитывают нулевой компонент $r_0 = 1 - r_{h_{jz}}$.

2.4. Определяют остальные компоненты: $r_i = 0$, $i = \overline{1, h_{jz} - 1}$.

3. Формируют матрицу Грама векторов μ_z и r^{T}:

$$G(\mu_z, r^{\mathrm{T}}) = (\mu_{z0}\ \mu_{z1} \dots \mu_{zk_z}) \begin{pmatrix} r_0 \\ r_1 \\ \vdots \\ r_{h_{jz}} \end{pmatrix} = \begin{vmatrix} \mu_{z0} \wedge r_0\ \mu_{z0} \wedge r_1 \dots \mu_{z0} \wedge r_{h_{jz}} \\ \mu_{z1} \wedge r_0\ \mu_{z1} \wedge r_1 \dots \mu_{z1} \wedge r_{h_{jz}} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \mu_{zk_z} \wedge r_0\ \mu_{zk_z} \wedge r_1 \dots \mu_{zk_z} \wedge r_{h_{jz}} \end{vmatrix},$$

где $g_{\ell k} = \mu_{z\ell} \wedge r_k$, $\ell = \overline{0, k_z}$, $k = \overline{0, h_{jz}}$.

4. Вычисляют вектор диагональной свертки матрицы Грама $C(G(\mu_z, r^{\mathrm{T}}))$:

$$C(G(\mu, r^{\mathrm{T}})) = \left| \begin{array}{c} (\mu_{z0} \wedge r_0) \\ (\mu_{z1} \wedge r_0) \vee (\mu_{z0} \wedge r_1) \\ \dots\dots\dots\dots \\ (\mu_{zk_z} \wedge r_0) \vee (\mu_{zk_{z-1}} \wedge r_1) \vee \dots \vee (\mu_{z-h_{jz}} \wedge r_{h_{jz}}) \\ \dots\dots\dots\dots \\ (\mu_{zk_z} \wedge r_{h_{jz}}) \end{array} \right|.$$

Элементы этого вектора рассчитывают по формуле $c_\ell = \underset{k+i=\ell}{\vee} (\mu_{zk} \wedge r_i)$ при $k = \overline{0, k_z}$, $i = \overline{1, h_{jz}}$. Размерность вектора распределения степеней принадлежности увеличивается на число $h_{jz}: k_z = k_z + h_{jz}$.

5. Формируют вектор $\mu'_z = (\mu'_{z0}\ \mu'_{z1} \dots \mu'_{kz})$ распределения степеней принадлежности выходной позиции $p_z : \mu'_{zk} = c_k$, $k = \overline{0, k_z}$.

Модель функционирования активных элементов гибкого производственного модуля нанесения рисунка. Рассмотрим функционирование гибкого производственного модуля (ГПМ) нанесения рисунка на алюминиевые карточки в производстве испарителей. В ГПМ процесс нанесения рисунка на карточки осуществляется так [4]. Транспортная система (ТС) перемещает зачищенные карточки к входному буферу устройства нанесения рисунка. Если рабочая зона устройства свободна, то карточка перемещается от входного буфера к рабочей позиции устройства. После нанесения рисунка карточка перемещается к позиции выходного буфера устройства нанесения рисунка. Затем промышленный робот (ПР) освобождает выходной буфер устройства, загружая ТС или накопитель для брака.

Модели функционирования активных элементов ГПМ нанесения рисунка на алюминиевые карточки представлены в виде стохастических СП и определены множества позиций и переходов.

Множество позиций: p_1 — устройство выполняет операцию нанесения рисунка на карточку; p_2 — наличие карточки без рисунка в приемной позиции устройства; p_3 — наличие карточки с рисунком в буферной выходной позиции устройства; p_4 — рабочая позиция устройства свободна; p_5 — приемная позиция устройства свободна; p_6 — выходная буферная позиция устройства свободна; p_7 — ПР свободен; p_8 — в приемной позиции ТС имеется карточка; p_9 — приемная позиция ТС не загружена; p_{10} — ПР загружает карточку в приемную позицию устройства; p_{11} — ПР из буферного накопителя на выходе устройства загружает карточку в приемную позицию ТС.

ISSN 0204–3572. Electronic Modeling. 2013. V. 35. № 4

Множество переходов: t_1 — загрузка приемной позиции устройства; t_2 —загрузка в приемную позицию устройства закончена; t_3 — выполнение операции нанесения рисунка; t_4 — операция нанесения рисунка закончена; t_5 — ПР выполняет загрузку из буферного накопителя на выходе устройства в приемную позицию ТС; t_6 — отправка карточки и освобождение выходной приемной позиции.

В результате продукция в виде условие—действие принимает вид

$$p_5 \text{ and } p_7 \text{ and } p_8 \Rightarrow t_1;\ p_{10} \Rightarrow t_2;\ p_2 \text{ and } p_4 \Rightarrow t_3;$$

$$p_1 \text{ and } p_6 \Rightarrow t_4;\ p_3 \text{ and } p_7 \text{ and } p_9 \Rightarrow t_5;\ p_{11} \Rightarrow t_6.$$

Функции входной и выходной инцидентности представляют соответственно матрицами F и H:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Элементы матрицы инцидентности вычисляют по формуле $d_{ij} = h_{ij} - f_{ij}$, $i = \overline{1,11}$, $j = \overline{1,6}$. Матрица инцидентности имеет вид

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Начальная маркировка представлена векторами:

$\mu(0,1) = (\ 1{,}000\ \ 0{,}000\ ),$

$\mu(0,2) = (\ 1{,}000\ \ 0{,}000\ ),$

$\mu(0,3) = (\ 1{,}000\ \ 0{,}000\ ),$

$\mu(0,4) = (\ 0{,}000\ \ 0{,}400\ \ 0{,}600),$

$\mu(0,5) = (\ 0{,}200\ \ 0{,}300\ \ 0{,}500),$

$\mu(0;6) = (\ 0{,}000\ \ 0{,}100\ \ 0{,}000\ \ 0{,}900\ ),$

$\mu(0,7) = (\ 0{,}100\ \ 0{,}200\ \ 0{,}700\ ),$

$\mu(0,8) = (\ 0{,}000\ \ 0{,}100\ \ 0{,}300\ \ 0{,}600\ ),$

$\mu(0,9) = (\ 0{,}300\ \ 0{,}000\ \ 0{,}000\ \ 0{,}700\ ),$

$\mu(0,10) = (\ 1{,}000\ \ 0{,}000\ ),$

$\mu(0,11) = (\ 1{,}000\ \ 0{,}000\ ).$

На основе разработанного алгоритма вычисляют элементы матрицы Грама и векторы диагональной свертки стохастических СП. В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов $\sigma = (t_1\ t_2\ t_3\ t_4\ t_5\ t_6)$ с учетом начальной маркировки μ_0.

Маркировка, полученная при срабатывании перехода t_1:

$\mu(1,1) = (\ 1.000\ \ 0.000\ ),$

$\mu(1,2) = (\ 1.000\ \ 0.000\ ),$

$\mu(1,3) = (\ 1.000\ \ 0.000\ ),$

$\mu(1,4) = (\ 0.000\ \ 0.400\ \ 0.600\ ),$

$\mu(1,5) = (\ 0.500\ \ 0.500\ ),$

$\mu(1,6) = (\ 0.000\ \ 0.100\ \ 0.000\ \ 0.900\ ),$

$\mu(1,7) = (\ 0.300\ \ 0.700\ ),$

$\mu(1,8) = (\ 0.100\ \ 0.300\ \ 0.600\ ),$

$\mu(1,9) = (\ 0.300\ \ 0.000\ \ 0.000\ \ 0.700\ ),$

$\mu(1,10) = (\ 0.280\ \ 0.720\ \ 0.000\ ),$

$\mu(1,11) = (\ 1.000\ \ 0.000\ ).$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода t_2:

$\mu(2,1) = (\ 1.000\ \ 0.000\ ),$

$\mu(2,2) = (\ 0.280\ \ 0.720\ \ 0.000\ ),$

$\mu(2,3) = (\ 1.000\ \ 0.000\ ),$

$\mu(2,4) = (\ 0.000\ \ 0.400\ \ 0.600\ ),$

$\mu(2,5) = (\ 0.500\ \ 0.500\ ),$

$\mu(2,6) = (\ 0.000\ \ 0.100\ \ 0.000\ \ 0.900\ ),$

$\mu(2,7) = (\ 0.084\ \ 0.412\ \ 0.504\ ),$

$\mu(2,8) = (\ 0.028\ \ 0.156\ \ 0.384\ \ 0.432\ ),$

ISSN 0204–3572. Electronic Modeling. 2013. V. 35. № 4

$\mu(2,9) = (\ 0.300\quad 0.000\quad 0.000\quad 0.700\ ),$
$\mu(2,10) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(2,11) = (\ 1.000\quad 0.000\ ).$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода t_3:

$\mu(3,1) = (\ 0.280\quad 0.720\quad 0.000\ ),$
$\mu(3,2) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(3,3) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(3,4) = (\ 0.400\quad 0.600\ ),$
$\mu(3,5) = (\ 0.140\quad 0.500\quad 0.360\ ),$
$\mu(3,6) = (\ 0.000\quad 0.100\quad 0.000\quad 0.900\ ),$
$\mu(3,7) = (\ 0.084\quad 0.412\quad 0.504\ ),$
$\mu(3,8) = (\ 0.028\quad 0.156\quad 0.384\quad 0.432\ ),$
$\mu(3,9) = (\ 0.300\quad 0.000\quad 0.000\quad 0.700\ ),$
$\mu(3,10) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(3,11) = (\ 1.000\quad 0.000\ ).$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода t_4:

$\mu(4,1) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(4,2) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(4,3) = (\ 0.280\quad 0.720\quad 0.000\ ),$
$\mu(4,4) = (\ 0.112\quad 0.456\quad 0.432\ ),$
$\mu(4,5) = (\ 0.140\quad 0.500\quad 0.360\ ),$
$\mu(4,6) = (\ 0.100\quad 0.000\quad 0.900\ ),$
$\mu(4,7) = (\ 0.084\quad 0.412\quad 0.504\ ),$
$\mu(4,8) = (\ 0.028\quad 0.156\quad 0.384\quad 0.432\ ),$
$\mu(4,9) = (\ 0.300\quad 0.000\quad 0.000\quad 0.700\ ),$
$\mu(4,10) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(4,11) = (\ 1.000\quad 0.000\ ).$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода t_5:

$\mu(5,1) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(5,2) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(5,3) = (\ 1.000\quad 0.000\ ),$
$\mu(5,4) = (\ 0.112\quad 0.456\quad 0.432\ ),$
$\mu(5,5) = (\ 0.140\quad 0.500\quad 0.360\ ),$
$\mu(5,6) = (\ 0.100\quad 0.000\quad 0.900\ ),$
$\mu(5,7) = (\ 0.496\quad 0.504\ ),$
$\mu(5,8) = (\ 0.028\quad 0.156\quad 0.384\quad 0.432\ ),$
$\mu(5,9) = (\ 0.300\quad 0.000\quad 0.700\ ),$

$\mu(5,10) = (\ 1.000 \quad 0.000\ ),$
$\mu(5,11) = (\ 0.538 \quad 0.462 \quad 0.000\ ).$

Маркировка, полученная при срабатывании перехода t_6:

$\mu(6,1) = (\ 1.000 \quad 0.000\ ),$
$\mu(6,2) = (\ 1.000 \quad 0.000\ ),$
$\mu(6,3) = (\ 1.000 \quad 0.000\ ),$
$\mu(6,4) = (\ 0.112 \quad 0.456 \quad 0.432\ ),$
$\mu(6,5) = (\ 0.140 \quad 0.500 \quad 0.360\ ),$
$\mu(6,6) = (\ 0.054 \quad 0.046 \quad 0.485 \quad 0.415\ ),$
$\mu(6,7) = (\ 0.267 \quad 0.500 \quad 0.233\ ),$
$\mu(6,8) = (\ 0.028 \quad 0.156 \quad 0.384 \quad 0.432\ ),$
$\mu(6,9) = (\ 0.162 \quad 0.138 \quad 0.377 \quad 0.323\ ),$
$\mu(6,10) = (\ 1.000 \quad 0.000\ ),$
$\mu(6,11) = (\ 1.000 \quad 0.000\ ).$

Таким образом, представленные правила срабатывания переходов полностью описывают процесс функционирования стохастических СП.

Выводы

Разработанные алгоритмы функционирования стохастических и нечетких СП обеспечивают удобное преобразование внешних данных во внутренний формат, используемый в среде моделирования, эффективную форму представления структуры, динамику состояния модели, пространство достижимых состояний и последовательность срабатывания переходов в виде совокупности векторов и матриц, упрощение и ускорение процесса моделирования, автоматическое выявление тупиковых ситуаций. Программа разработана в системе DELPHI 7.0 на основе описанных алгоритмов. Ресурсы современных компьютеров позволяют решать задачи с матрицами достаточно большого размера, что вполне удовлетворяет требования, предъявляемые к моделированию реальных сложных объектов, функционирующих в условиях неопределенности.

Simulation of dynamic interacting processes which describe the functioning of complicated objects in conditions of indeterminacy has been considered. The models of dynamic processes are presented in a form of stochastic and fuzzy Petri nets. On the example of flexible manufacturing module of making a picture it was shown that the accepted rules of activating transitions describe completely the process of functioning of the Petri stochastic nets.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бодянский Е.В., Кучеренко Е.И., Михалев А.И.* Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем. — Днепропетровск : Системная технология, 2005. — 311 с.
2. *Осуга С.* Обработка знаний. —М.: Мир, 1986. —293 с.
3. *Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М.* Сети Петри в моделировании и управлении. — Л. : Наука, 1989. — 133 с.
4. *Akhmedov M.A., Mustafayev V.A.* Development of fuzzy model for investigation functioning active elements of the flexible manufacture module / Proc. 9th Internat. Conf. on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS—2010) Prague, Czech Republic, August 26—27, 2010. — b-Quadrat Verlag. — P. 315—320.

Поступила 03.04.13;
после доработки 18.06.13

АХМЕДОВ Магомед Айдын оглы, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой информационных технологий и программирования Сумгаитского госуниверситета. В 1969 г. окончил Азербайджанский ин-т нефти и химии. Область научных исследований — элементы искусственного интеллекта в моделировании и управлении.

МУСТАФАЕВ Валех Азад оглы, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой информатики Сумгаитского госуниверситета. В 1980 г. окончил Азербайджанский госуниверситет. Область научных исследований — элементы искусственного интеллекта в моделировании и управлении.