

Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких временных сетей Петри

В.А Мустафаев, М. Н.Салманова

Издание: XXXII Международная научная конференция
«Математические методы в технике и технологиях» - ММТТ-32,
2019, Т. 3

ISSN 2587-9049

<http://mmtt.sstu.ru>

Цитирование: Мустафаев В.А. Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких временных сетей Петри /В.А Мустафаев, М. Н. Салманова// **Математические методы в технике и технологиях**: сб. тр. междунар. науч. конф.: в 12 т. Т. 3 / под общ. ред. А.А. Большакова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. С. 43- 50.

Издатель ©Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019
©Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2019

Обложка



УДК 519.95

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

В.А Мустафаев*, М. Н.Салманова**

*Сумгаитский государственный университет,

Азербайджанская Республика, Сумгаит, valex-sdu@mail.ru

**Сумгаитский государственный университет,

Азербайджанская Республика, Сумгаит, malaxat_70@mail.ru

Аннотация: Рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов, описывающих функционирование сложных объектов в условиях неопределенности. Предложен формализм, предназначенный для разработки и анализа моделей сложных параллельных и распределенных систем, который базируется на математическом аппарате временных сетей Петри (СП), представляющих обобщенные нечеткие временные СП типа Vf, совмещающие детерминированного и недетерминированного характера. Разработан алгоритм функционирования нечетких временных СП типа Vf. Модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств представлена в виде нечетких временных СП типа Vf. На примере производственного модуля механообработки показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью описывают процесс функционирования нечетких временных СП типа Vf. В результате симуляции получено дерево достижимости в виде последовательности матриц.

Ключевые слова: модель, алгоритм, нечеткие временные сети Петри, матрица инцидентов, модуль механообработки, трапециевидный нечеткий интервал, функция принадлежности.

MODELING THE DYNAMIC INTERACTION PROCESSES USING OF FUZZY TIMED PETRI NETS

V.A Mustafayev*, M.N.Salmanova**

*Sumgayit State University, Republic of Azerbaijan, Sumgayit, valex-sdu@mail.ru

**Sumgayit State University, Republic of Azerbaijan, Sumgayit, malaxat_70@mail.ru

Abstract: The Modeling of dynamic interacting processes is examined in the article, which shows the operation of complex objects in the condition of uncertainty. Formalism intended for the development and analysis of models of complex parallel and distributed systems is proposed. It is based on the mathematical apparatus of the fuzzy timed Petri nets (FTPN) of type Vf, representing generalized FTPN of type Vf, combining deterministic and non-deterministic character. Developed is the algorithm for the functioning of fuzzy timed PN. The model of parallel functioning processing devices is presented in the form of FTPN of type Vf. On the example of the production model of mechanical processing, it is shown that the accepted rules of triggering transitions fully show the functioning process of FTPN of type Vf. As a result of the simulation, the reachability tree is obtained as a sequence of matrices.

Key words: model, algorithm, fuzzy timed Petri nets, incident matrix, machining module, trapezoidal fuzzy interval, membership function.

Введение. Сети Петри (СП) и их многочисленные модификации являются одним из классов моделей, достоинством которых является возможность адекватного представления не только структуры сложных распределенных систем, но также и логико-временных особенностей процессов их функционирования [1, 2]. Различные модификации СП представляют математическую модель для представления структуры и анализа динамики функционирования систем в терминах «условие-событие». Модели СП позволяют исследовать работоспособность моделируемых систем, оптимальность их структуры, эффективность процесса их функционирования, а также возможность достижения в процессе функционирования определенных состояний. СП и их обобщения являются удобным и мощным средством моделирования асинхронных, параллельных распределенных и недетерминированных процессов, позволяют наглядно представить динамику функционирования систем и составляющих их элементов. Свойства иерархического вложения СП позволяет рассматривать модели

Моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких временных сетей Петри

различной степени детализации, обеспечивая необходимую декомпозицию сложных систем и процессов. Как известно, существуют большое количество разновидностей и расширений СП, к которым следует отнести временные, раскрашенные, алгебраические и другие модификации СП[3,5].

Данные классы моделей позволяют представить структуры и динамику функционирования моделируемых систем в условиях отсутствия влияния тех или иных факторов неопределенности. Указанное предположение о детерминированном характере структурных взаимосвязей и динамики функционирования СП существенно ограничивает возможности практического использования моделей данных классов и не отражает адекватным образом отдельные аспекты знаний о предметной области. Включение описания неопределенности в различные детерминированные разновидности и обобщения СП может быть осуществлено различным образом по каждому из основных компонентов исходного формализма соответствующего класса СП. При этом можно рассматривать различные формы неопределенности (стохастическая, нечеткая, комбинированная) то, следуя по этому пути можно получить несколько вариантов формализма соответствующих классов СП с неопределенностью. В связи с этим, в представленной работе рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением нечетких временных СП типа V_f с неопределенностью маркировки позиций. Разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов нечетких временных СП типа V_f .

Правила срабатывания переходов и алгоритм функционирования нечетких временных сетей Петри типа V_f . Модель динамических взаимодействующих процессов представляется в виде нечетких временных сетей Петри типа V_f (НВСП V_f). НВСП V_f определяется в виде $V_f = (N, M_0, Z_f, S_f)$, где $N = (P, T, I, O)$ – структура НВСП V_f , $P = \{p_i\}$, ($i = 1, \dots, n$; n – число позиций) – множество позиций; $T = \{t_k\}$, ($k = 1, \dots, m$; m – число переходов) – множество переходов; $I : P \times T \rightarrow N_0$; $O : T \times P \rightarrow N_0$ – соответственно входная и выходная функция переходов; $N_0 = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ множество натуральных чисел и ноль; M_0 – матрица начальной маркировки, размерность которой равна $(n \times (d + 1))$. Каждый элемент μ_{ij}^0 начальной матрицы равен значению функции принадлежности наличия $(j - 1)$ числа маркеров в позиции p_i НВСП V_f на момент начала ее запуска. По определению функции принадлежности элементы матрицы начальной маркировки должны удовлетворять следующему условию [5]:

$$\mu_{ij}^0 \in [0, 1] \quad (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall j \in J) \quad (1)$$

Размерность J определяется следующим образом: $J = \{1, \dots, d, d + 1\} \subset N_0$. Количество столбцов матрицы начальной маркировки определяется максимальным количеством вводимых в рассмотрение маркеров в позициях НВСП V_f , которое в общем случае принимается равным d .

$Z_f = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях НВСП V_f , каждый компонент, который представляет собой трапециевидный нечеткий интервал (ТНИ) :

$$z_i = \langle z_{i1}, z_{i2}, z_{i3}, z_{i4} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\}).$$

$S_f = (s_1, s_2, \dots, s_m)$ – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов НВСПВ_f, каждый компонент, который представляет собой ТНИ:

$$s_j = \langle s_{1j}, s_{2j}, s_{3j}, s_{4j} \rangle, (j \in \{1, 2, \dots, m\}).$$

ТНИ называется нормальный нечеткий интервал, функция принадлежности которого задается трапецевидной функцией f_T :

$$f_T(x; a, b, \alpha, \beta) = \begin{cases} 0, & x \leq \alpha \\ \frac{x - \alpha}{a - \alpha}, & \alpha \leq x \leq a \\ 1, & a \leq x \leq b \\ \frac{\beta - x}{\beta - b}, & b \leq x \leq \beta \\ 0, & \beta \leq x \end{cases}$$

ТНИ представляется в виде кортежа из четырех чисел: $A_T = \langle a, b, \alpha, \beta \rangle$, где a, b, α, β некоторые числовые параметры, принимающие произвольные действительные значения и упорядоченные отношением: $\alpha \leq a \leq b \leq \beta$. a и b – соответственно нижние и верхние модальные значения ТНИ; α и β левый и правый коэффициенты нечеткости ТНИ.

Динамика изменения начальной и последующих маркировок НВСПВ_f после момента ее запуска подчиняется следующим правилам [6]:

Правило 1. Определения текущего состояния. Любое текущее состояние НВСПВ_f определяется некоторой матрицей M размерности $(n \times (d + 1))$, элементы которой удовлетворяют условию (1) и представляется как значения степеней принадлежности нечеткого наличия $\{0, 1, 2, \dots, d\}$ число маркеров в соответствующих позициях $p_i \in P$ НВСПВ_f. Начальное состояние НВСПВ_f определяется матрицей начальной маркировки M_0 размерностью $(n \times (d + 1))$.

Правило 2. Определения активности переходов. Переход $t_k \in T$ НВСПВ_f называется активным при некоторой текущей маркировке M , если выполнено следующее условие:

$$\partial \geq (I(p_1, t_k), I(p_2, t_k), \dots, I(p_l, t_k)) \quad (2)$$

где компоненты вектора $\partial = (\partial_1, \partial_2, \dots, \partial_n)$ определяются по формуле:

$$\partial_i = \max_{(j \in J) \wedge (m_{ij} > 0)} \{j - 1\} \quad (\forall p_i \in P).$$

Другими словами, некоторый переход $t_k \in T$ НВСПВ_f является разрешенным, если для текущей маркировки M во всех его входных позициях имеется нечеткое количество маркеров, которое больше или равно количеству дуг, соединяющих соответствующие входные позиции с рассматриваемым переходом. Маркеры в позициях могут находиться в двух состояниях – доступном и недоступном. На маркеры в позициях действует временные задержки. По истечении времени блокировки, маркеры переходят в выходные позиции разрешенных незаблокированных переходов t_k в период времени s_k , по следующим правилам:

Правило 3. Нечеткое срабатывание переходов. Если переход $t_k \in T$ НВСПВ_f является активным при некоторой текущей маркировке M , то срабатывание данного

перехода, осуществляемое за время $s_k = \langle s_{kj}, s_{kj}, s_{kj}, s_{kj} \rangle$ приводит к новой маркировке M_v элементы которой определяются следующим образом:

– для каждой из входных позиций $p_i \in P$ НВСПВ_f, для которых $I(p_i, t_k) \neq 0$, по формулам:

$$\mu_{i1}^v = \max_{j \in \{1, 2, \dots, J(p_i, t_k)+1\}} \{\mu_{ij}\}; \quad (3)$$

$$\mu_{ij}^v = \mu_{i, j+I(p_i, t_k)} \quad (\forall j \in J \setminus \{1\}) \quad (4)$$

– для каждой из выходных позиций $p_i \in P$, для которых $O(t_k, p_i) \neq 0$ по формулам:

$$\mu_{ij}^v = \min\{\mu_{ij}, 1 - q_k\} \quad (\forall j \in \{1, 2, \dots, O(t_k, p_i)\}); \quad (5)$$

$$\mu_{ij}^v = \max\{\min\{\mu_{ij}, 1 - q_k\}, \min\{\mu_{i, j-O(t_k, p_i)}, q_k\}\} \quad (\forall j \in J) \wedge (j > O(t_k, p_i)) \quad (6)$$

где q_k – степень принадлежности нечеткого срабатывания перехода $t_k \in T$, который вычисляется по формуле:

$$q_k = \min_{(i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge (j \in J) \wedge (j > I(p_i, t_k))} \{\max\{\mu_{ij}\}\} \quad (\forall t_k \in T).$$

Если некоторые из позиций $p_i \in P$ являются одновременно входными и выходными для разрешенного перехода $t_k \in T$, то для них элементы матрицы новой маркировки M_v вычисляются последовательно, вначале по формулам (3)–(4), а затем по формулам (5)–(6).

Правило 4. Нечеткая задержка маркеров в позициях. В соответствии с правилом 3. маркеры в выходных позициях для новой маркировки будут недоступными. На них начинают действовать временные задержки определяемые вектором Z . Каждый маркер будет недоступным в позиции p_r в течение времени $z_r = \langle z_r, z_{r2}, z_{r3}, z_{r4} \rangle$, начиная с момента его появления в p_r (z_r – время блокировки маркера в позиции p_r , по истечении которого маркер снова становится доступным).

Учитывая вышеизложенное, разработан алгоритм функционирования НВСПВ_f.

Начало алгоритма

Шаг 1. Создание матрицы входных инцидентов $D^- = [d_{ij}^-]$, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$ (n – число позиций; m – число переходов). Элемент d_{ij}^- равен числу дуг от i -й позиции к j -му переходу:

$$d_{ij}^- = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in I(t_j); \\ 0, & \text{если } p_i \notin I(t_j). \end{cases}$$

Шаг 2. Создание матрицы выходных инцидентов $D^+ = [d_{ij}^+]$, где $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$. Элемент d_{ij}^+ равен числу дуг от j -го перехода к i -й позиции:

$$d_{ij}^+ = \begin{cases} 1, & \text{если } p_i \in O(t_j); \\ 0, & \text{если } p_i \notin O(t_j), \end{cases}$$

где $l \in N_0$.

Шаг 3. Определение количества столбцов d матрицы начальной маркировки M_0 :

3.1 Полагают $\max = d_{11}^-$;

3.2 Если $d_{ij}^- > \max$, то присваивается $\max = d_{ij}^-$, где $j = \overline{1, m}$, $i = \overline{1, n}$;

3.3 Принимают $d = \max$;

Шаг 4. Создание матрицы начальной маркировки $M_0 = [\mu_{ij}]$, где $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, d}$;

Шаг 5. Создание вектора задержек маркеров в позициях: $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$;

Шаг 6. Создание вектора времени срабатывания разрешенных переходов: $s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$;

Шаг 7. Начальное время функционирования сети $\tau_{0i} = 0$, $i = \overline{1, 4}$.

Шаг 8. Вычисление элементов вектора ∂ :

8.1 Полагают $i = 1$;

8.2 Полагают $r = 0$;

8.3 Если $\mu_{ij} \neq 0$, то присваивается $r = j$, для всех $j = \overline{1, d}$;

8.4 Присваивается $\partial_i = r - 1$ и индекс i увеличивается на единицу: $i = i + 1$. Если $i \leq n$, то осуществляется переход к п. 8.2, в противном случае осуществляется переход к шагу 9;

Шаг 9. Поиск разрешенного перехода: для каждого перехода t_j , $j = \overline{1, m}$ проверяется условие срабатывания: если для всех входных позиций перехода t_j выполняется условие $\partial_i \geq d_{ij}^-$ ($i = \overline{1, n}$), то переход t_j разрешен, и выполняется переход к шагу 11;

Шаг 10. Если для перехода t_j условие срабатывания не выполняется, то индекс j увеличивается на единицу: $j = j + 1$. Если $j \leq m$, то осуществляется переход шагу 9, в противном случае сообщается о тупиковом состоянии и осуществляется переход к концу алгоритма;

Шаг 11. Вычисление максимального времени блокировок маркеров входных позиций перехода t_j :

11.1. Полагают: $z_{\max_i} = 0$, для всех $i = \overline{1, 4}$;

11.2. Для всех $d_{ij}^- \neq 0$, $i = \overline{1, n}$ вычисляют:

11.3. Если $z_{i1} > z_{\max_1}$, то полагают $z_{\max_1} = z_{i1}$;

11.4. Если $z_{i2} > z_{\max_2}$, то полагают $z_{\max_2} = z_{i2}$;

11.5. Если $z_{i1} - z_{i3} > z_{\max_3}$, то вычисляют $z_{\max_3} = z_{i1} - z_{i3}$;

11.6. Если $z_{i2} + z_{i4} > z_{\max_4}$, то вычисляют $z_{\max_4} = z_{i2} + z_{i4}$;

Шаг 12. Вычисляется: $z_{\max_3} = z_{\max_1} - z_{\max_3}$; $z_{\max_4} = z_{\max_4} - z_{\max_2}$.

Шаг 13. Вычисление степени принадлежности q_j нечеткого срабатывания перехода t_j :

13.1 Если $d_{ij}^- \neq 0$ ($i = \overline{1, n}$), то полагают $q_j = \text{const} > 1$; $\max = \text{const} = 0$ и осуществляется переход к п. 13.2;

13.2 Если $\mu_{ir} > \max$, то присваивается $\max = \mu_{ir}$, ($r = \overline{d_{ij}^- + 1, d + 1}$);

13.3 Если $(\max < q_j) \wedge (\max > 0)$, то полагают $q_j = \max$, где \wedge – операция логического минимума;

Шаг 14. Вычисление нечеткого времени срабатывания τ_j перехода t_j :

$$\tau_{ji} = \tau_{ji} + z_{\max_i} + s_{ji}, i = \overline{1,4};$$

Шаг 15. Вычисление элементов матрицы новой маркировки M' :

15.1 Для всех $d_{ij}^- \neq 0, (i = \overline{1,n})$ вычисляется:

15.1.1 Полагают: $\max = \mu_{i1}$; если $\mu_{ir} > \max$, то присваивается $\max = \mu_{ir}$, $(r = 1, d_{ij}^- + 1)$; присваивается $\mu'_{i1} = \max$;

15.1.2 $\mu'_{ir} = \mu_{i, r+d_{ij}^-}$, $r = \overline{2, d+1}$;

15.2 Для всех $d_{ij}^+ \neq 0, (i = \overline{1,n})$ вычисляется:

15.2.1 Если выполняется условие $\mu_{ir} < 1 - q_j$ то, $\mu'_{ir} = \mu_{ir}$, в противном случае $\mu'_{ir} = 1 - q_j$, $(r = \overline{1, d_{ij}^+})$;

15.2.2 Если $\mu_{ir} < 1 - q_j$, то $\min 1 = \mu_{ir}$, в противном случае $\min 1 = 1 - q_j$; если $\mu_{i, r-d_{ij}^+} < q_j$, то $\min 2 = \mu_{i, r-d_{ij}^+}$, в противном случае $\min 2 = q_j$; если $\min 1 > \min 2$, то $\mu'_{ir} = \min 1$, в противном случае $\mu'_{ir} = \min 2$, для всех $r = \overline{d_{ij}^+ + 1, d+1}$.

Шаг 16. Новая маркировка принимается за текущую: $\mu_{ir} = \mu'_{ir}; (i = \overline{1,n}; r = \overline{1, d+1})$ и осуществляется переход к шагу 8.

Конец алгоритма.

Модель модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в системе механообработки. Рассмотрим типовой обрабатывающий центр механообработки, состоящий из трех персональных входных накопителей, из трех параллельно функционирующих однотипных обрабатывающих устройств(ОУ) для выполнения одинаковой операции над разными однотипными заготовками и из трех персональных выходных накопителей. На модуле обрабатываются детали одного типа. Заготовки поступают на персональных входных накопителей и ожидают обработку. Одно свободное устройство (всего таких устройств три) захватывает заготовку из левого или правого входного накопителя. Если все устройства свободны, то возникает конфликтная ситуация. Конфликт разрешается случайным выбором нечеткими законами композиции. Обработанные детали поступают на выходные накопители и ожидают отправку.

В граф-модели НВСПВ_f модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственной системе механообработки (рис 1.) состояния сети описываются следующими позициями: p_1, p_5, p_8 –соответственно ОУ1, ОУ2, ОУ3 в исходном состоянии и в режиме ожидания; p_3, p_4, p_6 –соответственно наличие заготовки во входных накопителях и входные накопители свободны; p_2, p_7, p_9 , соответственно, ОУ1, ОУ2, ОУ3 в конечном состоянии и на выходных накопителях находится обработанный деталь.

Возможные события в модуле описываются следующими переходами: t_1, t_3, t_5 – начинается обработка заготовки в ОУ1, ОУ2, ОУ3 соответственно; t_2, t_4, t_6 – заканчивается обработка заготовки в ОУ1, ОУ2, ОУ3 соответственно.

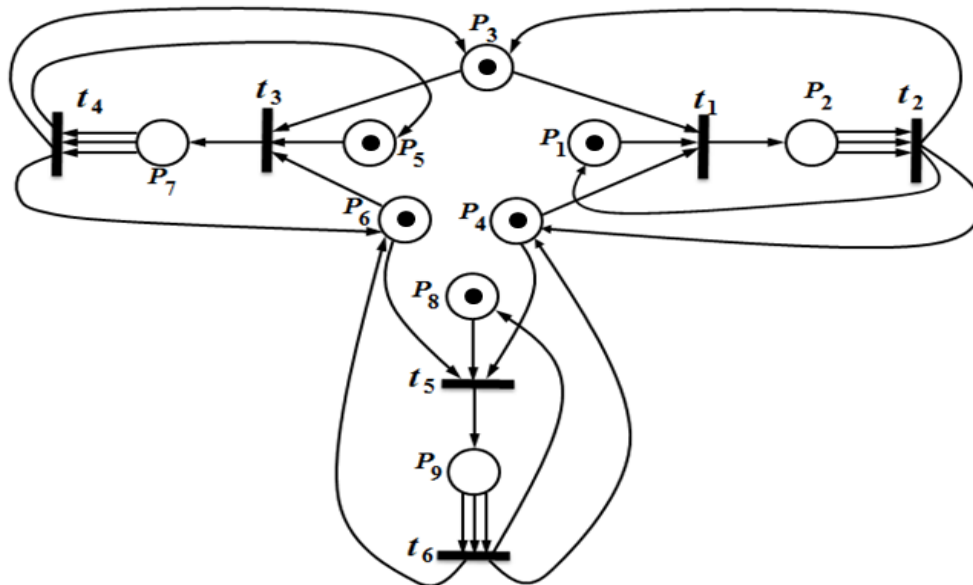


Рис. 1. Граф-модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств

Матрица входных инцидентов $D^-(6,9)$ и матрица выходных инцидентов $D^+(6,9)$ переходов сети описываются соответственно следующим образом:

$$D^-(6,9) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \end{pmatrix} \quad D^+(6,9) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Начальная маркировка сети представляется матрицей $\mu^0(9,4)$:

$$\mu^0(9,4) = \begin{pmatrix} 0.30 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.50 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix}$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях: $z_1 = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$, $z_2 = \langle 2, 3, 1, 1 \rangle$, $z_3 = \langle 3, 4, 1, 1 \rangle$, $z_4 = \langle 2, 3, 1, 0 \rangle$, $z_5 = \langle 2, 4, 1, 1 \rangle$, $z_6 = \langle 1, 4, 0, 3 \rangle$, $z_7 = \langle 3, 5, 1, 1 \rangle$, $z_8 = \langle 2, 3, 0, 1 \rangle$, $z_9 = \langle 4, 5, 0, 1 \rangle$.

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов: $s_1 = \langle 0, 1, 0, 1 \rangle$, $s_2 = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$, $s_3 = \langle 2, 3, 0, 1 \rangle$, $s_4 = \langle 3, 4, 0, 1 \rangle$, $s_5 = \langle 2, 3, 0, 1 \rangle$, $s_6 = \langle 1, 2, 1, 0 \rangle$.

На основе начальных данных проведен компьютерный эксперимент и из начальной маркировки получена последовательность срабатывания переходов $\sigma = (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6)$. Время нечеткого срабатывания переходов: $\tau = \langle 3, 5, 1, 2 \rangle$, $\tau = \langle 6, 10, 2, 4 \rangle$, $\tau = \langle 11, 17, 3, 8 \rangle$, $\tau = \langle 17, 26, 4, 10 \rangle$, $\tau = \langle 21, 33, 4, 14 \rangle$, $\tau = \langle 26, 40, 5, 15 \rangle$.

В результате срабатывания переходов получено последовательность матриц маркировок:

$$\begin{aligned}
 \mu_1 &= \begin{pmatrix} 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.30 & 0.60 \\ 0.70 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix} & \mu_2 &= \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.70 & 0.00 & 0.00 \\ 0.30 & 0.90 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix} & \mu_3 &= \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.70 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.90 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.40 & 0.60 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix} \\
 \mu_4 &= \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.70 & 0.80 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.60 & 0.90 \end{pmatrix} & \mu_5 &= \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.80 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.10 & 0.20 & 0.40 & 0.60 \end{pmatrix} & \mu_6 &= \begin{pmatrix} 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.40 & 0.60 & 0.00 & 0.00 \\ 0.60 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Выводы. Разработанный алгоритм функционирования НВСПV_f обеспечивает 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; автоматическое выявление тупиковых ситуаций. На основе предложенного алгоритма разработан модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственной системе механообработки. Программа разработана в системе Delphi 7.0 на основе алгоритма. Ресурсы современных компьютеров позволяют решать задачи с матрицами достаточно большого размера, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемые к моделированию реальных сложных распределенных систем функционирующих в условиях неопределенности.

Библиографический список

1. Емельянова Г.М., Смирнова Е.И. Сети Петри в задачах моделирования сложных систем. Нечеткая сеть Петри. М. 2002, 264 с.
2. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. БХВ–Петербург. 2006, 284 с.
3. Егоров А.С., Шайкин А.Н. Логическое моделирование в условиях неопределенности на базе нечетких интервальных сетей Петри // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2002. №2. С.134-139.
4. Holliday M.A., Vernon M.K., A Generalized Timed Petri Net Model For Performance Analysis, IEEE TRANSACTIONS ON SOFTWARE ENGINEERING. 1987. vol. 13, no. 12
5. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH.- БХВ-Петербург, Санкт-Петербург, 2005. 717 с.
6. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети.–Телеком, Москва. 2012. 284 с.