

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОБРАБАТЫВАЮЩЕГО ЦЕНТРА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКИХ ВРЕМЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ

© 2018 В.А. Мустафаев, М.Н. Салманова

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджанская Республика

**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 собой обобщенные нечеткие временные СП специального вида, совмещающие в себе поведение детерминированного и недетерминированного характера. Разработан алгоритм функционирования нечетких временных СП. Предлагаемый алгоритм обеспечивает решение задачи разрешимости срабатывания переходов, находящихся в состояниях конфликта, наложение нечеткой структуры на маркировку сети нечеткими законами композиции, определяющими значения степеней принадлежности входных и выходных позиций переходов. Модели динамических процессов представлены в виде нечетких временных сетей Петри. Предложен подход для моделирования динамических взаимодействующих процессов, основанный на матричной теории СП, которая обеспечивает эффективную форму представления структуры, динамики состояния модели, пространства достижимых состояний и последовательности срабатывания переходов в виде совокупности векторов и матриц. На примере производственного модуля механообработки показано, что принятые правила срабатывания переходов полностью описывают процесс функционирования нечетких временных сетей Петри. В результате симуляции получено дерево достижимости в виде последовательности векторов

**Ключевые слова:** модель, алгоритм, трапециевидный нечеткий интервал, нечеткие временные сети Петри, модуль механообработки

### Введение

Одной из основных задач нечеткого моделирования является исследование параллельных динамических взаимодействующих процессов, функционирующих в условиях неопределенности, обусловленной нечеткостью временных, ресурсных и других ограничений [1, 2]. Структурные связи, функциональные и причинно-следственные отношения между элементами системы, характеризующимися неопределенными параметрами, усложняют решение задачи.

Перспективно в данном случае применение различных расширений моделирующего аппарата нечеткой сети Петри. В статье представлена в виде нечеткой временной сети Петри (НВСП) модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственном модуле механообработки. Разработан алгоритм вычисления структурных элементов НВСП.

### Представление модели динамических процессов в виде НВСП и определение правила срабатывания переходов

Нечеткое моделирование основывается на теорию нечетких множеств и нечеткую логику. Информация, используемая в среде, в которой происходит моделирование, может содержать точные числовые данные, интервалы четких и нечетких данных и знаний, а также лингвистические переменные. Преобразование этой внешней формы информации во внутренний формат, который используется в нечеткой модели, реализуемой через различные процедуры соответствия, является сложной и важной задачей. Входящие в модель управления входные и выходные лингвистические переменные могут задаваться как нечеткое число или нечеткий интервал. В связи с этим треугольные и трапециевидные функции принадлежности нечеткого множества могут быть выбраны как структурные элементы модели.

Трапециевидный нечеткий интервал (ТНИ) представляется в виде кортежа из четырех чисел:  $A = \langle a, b, \alpha, \beta \rangle$ , где  $a$  и  $b$  – соответственно нижнее и верхнее модальные значения ТНИ;  $\alpha$  и  $\beta$  – левый и правый коэффициенты нечеткости ТНИ [3].

Для решения задач нечеткого моделирования необходимо определить некоторые операции над ТНИ, аналогичные арифметическим операциям над обычными числами и интервалами. Для определения аналогов обычных арифметических операций над нечеткими числами и нечеткими интервалами используется принцип обобщения [4].

Модель динамических взаимодействующих процессов представляется в виде НВСП.

Нечёткая временная сеть Петри определяется выражением [4,5]

$$C_T = (N, \mu_0, Z_T, S_T), \quad (1)$$

где  $N = (P, T, I, O)$  – структура НВСП:  $P = \{p_i\}$ , ( $i = 1, \dots, n$ ;  $n$  – число позиций) – множество позиций;  $T = \{t_j\}$ , ( $j = 1, \dots, m$ ;  $m$  – число переходов) – множество переходов;  $I: P \times T \rightarrow \{0,1\}$ ;  $O: T \times P \rightarrow \{0,1\}$  – соответственно входная и выходная функция переходов;

$\mu_0 = (\mu_1^0, \mu_2^0, \dots, \mu_n^0)$  – вектор начальной маркировки, каждый компонент  $\mu_i^0$  который представляет собой ТНИ

$$\mu_i^0 = \langle \mu_{1i}^0, \mu_{2i}^0, \mu_{3i}^0, \mu_{4i}^0 \rangle (i \in \{1, 2, \dots, n\}), \quad (2)$$

$z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях НВСП, каждый компонент  $z_i$  который представляет собой ТНИ

$$z_i = \langle z_{1i}, z_{2i}, z_{3i}, z_{4i} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\}), \quad (3)$$

$s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$  – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов НВСП, каждый компонент  $s_j$  который представляет собой ТНИ

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

Текущее состояние НВСП определяется вектором  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , компоненты которого представляет собой ТНИ  $\mu_i = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}, \mu_{4i} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\})$  и интерпретируется как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях  $p_i \in P$  относительно времени, отсчитываемого от момента запуска данной НВСП.

Переход  $t_k \in T$  НВСП называется разрешенным при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , если выполнено следующее условие [3]

$$\mu_i = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}, \mu_{4i} \rangle > 0 \quad (5)$$

$$/(\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)$$

Если переход  $t_k \in T$  НВСП разрешен при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , то нечеткое срабатывание данного перехода, осуществляемое за время  $s_k = (s_{1k}, s_{2k}, s_{3k}, s_{4k})$  приводит к новой маркировке  $\mu_k$ , компоненты вектора которой определяются следующим образом:

для каждой из входных позиций  $p_i \in P$ ,

для которых  $I(p_i, t_k) > 0$ , по формуле:

$$\mu'_i = \langle \mu'_{1i}, \mu'_{2i}, \mu'_{3i}, \mu'_{4i} \rangle = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle \quad (6)$$

$$/(\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0)$$

для каждой из выходных позиций  $p_j \in P$ ,

для которых  $O(t_k, p_j) > 0$ , по формуле:

$$\mu'_j = \min \{ \max \{ \mu_i \} + s_k, \mu_j \} \quad (7)$$

$$(i \in \{1, 2, \dots, n\}) \wedge I(p_i, t_k) > 0)$$

$$(\forall p_j \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0, 0 \rangle)$$

где  $\max$ ,  $\min$  – расширенная операция максимума и минимума для ТНИ, а “+” операция сложения ТНИ;

для каждой позиции  $p_i \in P$ , не являющейся входным и выходным, по формуле:

$$\mu'_i = \langle \mu'_{1i}, \mu'_{2i}, \mu'_{3i}, \mu'_{4i} \rangle = \langle \mu_{1i}, \mu_{2i}, \mu_{3i}, \mu_{4i} \rangle \quad (8)$$

$$(\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) = 0) \wedge (O(t_k, p_j) = 0)$$

Если некоторые из позиций  $p_j \in P$  являются одновременно входными и выходными для разрешенного перехода  $t_k \in T$ , то для них компоненты вектора новой маркировки рассчитываются последовательно, вначале по формуле (6), затем по формуле (7).

После нечеткого срабатывания перехода соответствующие маркеры становятся доступными только после окончания действия временных задержек, которые определяют доступную маркировку  $\mu'_j$  по формуле:

$$\mu'_i = \mu_i + z_i \quad (9)$$

$$/(\forall p_i \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0, 0 \rangle)$$

Для выходных позиций  $p_j$  перехода  $t_k$ , для которых  $\mu_i = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$  по определению  $\mu'_j = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ .

### Алгоритм вычисления структурных элементов нечетких временных сетей Петри

При решении практических задач удобно использовать матричное представление структуры НВСП. Элементы матриц входных  $d_{ij}^-$ , выходных  $d_{ij}^+$  позиций и инцидентов  $d_{ij}$  определяется так [6]:

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

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

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

*Начало алгоритма*

Шаг 1. Создание входных и выходных матриц, представляющих входную и выходную функции НВСП в размерности  $m \times n : d_{ij}^-, d_{ij}^+ (i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m})$ .

Шаг 2. Определение размерности и ввод временных параметров НВСП:

$$\mu_{ij}, z_{ij} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, n}); s_{ij} (i = \overline{1, k}; j = \overline{1, m}).$$

Шаг 3. Полагают:  $k = 1$ .

Шаг 4. Полагают:  $j = 1; q = 1; i = 0$ .

Шаг 5. Индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$ .

Шаг 6. Если выполняется условие  $i \leq n$ , то осуществляется переход к шагу 7, в противном случае к шагу 15.

Шаг 7. Создание промежуточной матрицы  $\mu_{li}^1 : \mu_{li}^1 = \mu_{li}; (l = \overline{1, 4})$ .

Шаг 8. Если выполняется условия  $(\mu_{li}^1 = 0) \wedge (\mu_{2i}^1 = 0) \wedge (\mu_{3i}^1 = 0) \wedge (\mu_{4i}^1 = 0)$ , то осуществляется переход к шагу 5, в противном случае к шагу 9.

Шаг 9. Вычисляют:  $\mu_{li}^1 = \mu_{li} + z_{li}; (l = \overline{1, 4})$ .

Шаг 10. Если выполняется условие  $i = d_{kj}^-$ , то осуществляется переход к шагу 11, в противном случае к шагу 5.

Шаг 11. Если  $j = l$ , то полагают:

$$\{\max_a = \mu_{li}^1; \max_b = \mu_{2i}^1; \max_\alpha = \mu_{3i}^1; \max_\beta = \mu_{4i}^1\}$$

и осуществляется переход к шагу 12, в противном случае к шагу 13.

Шаг 12. Обнулирование элементов матрицы  $\mu_{li}^1 : \mu_{li}^1 = 0 (l = \overline{1, 4})$ ; индекс  $j$  увеличивается на единицу:  $j = j + 1$  и осуществляется переход к шагу 5.

Шаг 13. Полагают:  $a_1 = \max_a; a_2 = \mu_{li}^1$ .

Шаг 14. Если выполняется условие  $a_1 \geq a_2$ , то  $\max'_a = a_1$ , в противном случае  $\max'_a = a_2$ ;

14.1 полагают:  $b_1 = \max_b; b_2 = \mu_{2i}^1$ ;

14.2 если выполняется условие  $b_1 \geq b_2$ , то  $\max'_b = b_1$ , в противном случае  $\max'_b = b_2$ ;

14.3 полагают:  $\alpha_1 = \max_\alpha; \alpha_2 = \mu_{3i}^1$ ;  
 $\beta_1 = \max_\beta; \beta_2 = \mu_{4i}^1$ ; вычисляют:  $\alpha'_1 = a_1 - \alpha_1$ ;  
 $\alpha'_2 = a_2 - \alpha_2$ ;

14.4 если выполняется условие  $\alpha'_1 \geq \alpha'_2$ , то  $\max'_\alpha = \alpha'_1$ , в противном случае  $\max'_\alpha = \alpha'_2$ ;

14.5 вычисляют:  $\max'_\alpha = \max'_\alpha - \max'_\alpha$ ;  
 $\beta'_1 = b_1 + \beta_1; \beta'_2 = b_2 + \beta_2$ ;

14.6 если выполняется условие  $\beta'_1 \geq \beta'_2$ , то  $\max'_\beta = \beta'_1$ , в противном случае  $\max'_\beta = \beta'_2$ ;

14.7 вычисляют:  $\max_\beta = \max'_\beta - \max'_\beta$ ;  
осуществляется переход к шагу 12.

Шаг 15. Полагают:  $i = 1$ .

Шаг 16. Если выполняется условие  $i \leq n$ , то осуществляется переход к шагу 17, в противном случае переход к шагу 25.

Шаг 17. Если выполняется условие  $i = d_{kq}^+$ , то осуществляется переход к шагу 18, в противном случае индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i = i + 1$  и осуществляется переход к шагу 16.

Шаг 18. Создание промежуточной матрицы  $\mu_{li}^2$  вычисляют:

$$\left\{ \begin{aligned} \mu_{li}^2 &= \max_a + s_{lk}; \mu_{2i}^2 = \max_b + s_{2k}; \\ \mu_{3i}^2 &= \max_\alpha + s_{3k}; \mu_{4i}^2 = \max_\beta + s_{4k} \end{aligned} \right\}.$$

Шаг 19. Если выполняются условия  $(\mu_{li}^1 = 0) \wedge (\mu_{2i}^1 = 0) \wedge (\mu_{3i}^1 = 0) \wedge (\mu_{4i}^1 = 0)$ , то осуществляется переход к шагу 20, в противном случае переход к шагу 21.

Шаг 20. Полагают:  $\mu_{li}^1 = \mu_{li}^2; (l = \overline{1,4})$ ; индекс  $i$  увеличивается на единицу:  $i=i+1$  и осуществляется переход к шагу 16.

Шаг 21. Если выполняется условие  $q=1$ , то полагают:

$\{\min_a = \mu_{1i}^2; \min_b = \mu_{2i}^2; \min_\alpha = \mu_{3i}^2; \max_\beta = \mu_{4i}^2\}$  и осуществляется переход к шагу 22, в противном случае переход к шагу 23.

Шаг 22. Полагают  $\{\mu_{li}^1 = \min_a; \mu_{2i}^1 = \min_b; \mu_{3i}^1 = \min_\alpha; \mu_{4i}^1 = \min_\beta\}$ ; значение  $q$  увеличивается на единицу:  $q=q+1$  и осуществляется переход к шагу 17.

Шаг 23. Полагают:  $a_1 = \min_a; a_2 = \mu_{1i}^2$ .

Шаг 24. Если выполняется условие  $a_1 \leq a_2$ , то  $\min'_a = a_1$ , в противном случае  $\min'_a = a_2$ ;

24.1 полагают:  $b_1 = \min_b; b_2 = \mu_{2i}^2$ ;

24.2 если выполняется условие  $b_1 \leq b_2$ , то  $\min'_b = b_1$ , в противном случае  $\min'_b = b_2$ ;

24.3 полагают:  $\alpha_1 = \min_\alpha; \alpha_2 = \mu_{3i}^2$ ;  
 $\beta_1 = \min_\beta; \beta_2 = \mu_{4i}^2$ ; вычисляют:  $\alpha'_1 = a_1 - \alpha_1$ ;  
 $\alpha'_2 = a_2 - \alpha_2$ ;

24.4 если выполняется условие  $\alpha'_1 \leq \alpha'_2$ , то  $\min'_\alpha = \alpha'_1$ , в противном случае  $\min'_\alpha = \alpha'_2$ ;

24.5 вычисляют:  $\min_\alpha = \min'_a - \min'_\alpha$ ;  
 $\beta'_1 = b_1 + \beta_1; \beta'_2 = b_2 + \beta_2$ ;

24.6 если выполняется условие  $\beta'_1 \leq \beta'_2$ , то  $\min'_\beta = \beta'_1$ , в противном случае  $\min'_\beta = \beta'_2$ ;

24.7 вычисляют:  $\min_\beta = \min'_b - \min'_\beta$  и осуществляется переход к шагу 22.

Шаг 25. Новая маркировка принимается за текущую:  $\mu_{lr}^1 = \mu_{lr}^2; (l = \overline{1,4}; r = \overline{1,n})$ .

Шаг 26. Значение  $k$  увеличивается на единицу:  $k=k+1$ . Если  $k \leq m$ , то осуществляется переход к шагу 4.

Конец алгоритма.

### Модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственном модуле механообработки

Производственный модуль механообработки состоит из одного промышленного робота, одного транспортного манипулятора, одного персонального входного накопителя, двух однотипных устройств для выполнения одинаковой операции над партиями однотипных деталей и из одного персонального выходного накопителя.

Связь модуля с предыдущим и последующим модулями происходит соответственно с помощью вышеуказанных накопителей. На модуле обрабатываются одного типа детали. Детали поступают на персональный входной накопитель и ожидают обработку. Свободное устройство 1 или устройство 2 захватывает детали из входного накопителя. Обработанные детали поступают на выходной накопитель и ожидают отправку к последующему модулю.

На рисунке представлена граф-схема модели параллельно функционирующего обрабатывающего устройства. Модель составленной структурными элементами НВСП состояний модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств описывается следующими позициями и переходами:

$p_1$  и  $p_2$  – соответственно обработка заготовки на устройстве 1 и на устройстве 2;  $p_3$  и  $p_4$  – соответственно устройство 1 и устройство 2 свободны;  $p_5$  и  $p_6$  – соответственно на вход устройства 1 и на вход устройства 2 доставлена заготовка;  $p_7$  и  $p_8$  – соответственно устройство 1 и устройство 2 выставили заявку на обслуживание;  $p_9$  – транспортный манипулятор выполняет заявку устройства 1 и устройства 2;  $p_{10}$  – робот свободен;  $t_1$  и  $t_2$  – соответственно выполнение обработки над заготовкой устройства 1 и устройства 2;  $t_3$  и  $t_4$  – соответственно выполнение разгрузки выходного накопителя устройства 1 и устройства 2;  $t_5$  и  $t_6$  – соответственно выполнение загрузки входного накопителя устройства 1 и устройства 2;  $t_7$  и  $t_8$  – соответственно выполнение заявки устройства 1 и устройства 2;  $z_1$  и  $z_2$  –

соответственно время обработки заготовки на устройстве 1 и на устройстве 2;  $z_3$  и  $z_4$  – соответственно время загрузки транспортного манипулятора на выходе устройства 1 и на выходе устройства 2 и перемещение от устройства 1 и от устройства 2 к выходному накопителю;  $z_5$  и  $z_6$  – соответственно время ожидания транспортного манипулятора и выполнение заявки устройства 1 и устройства 2;  $z_7$  и  $z_8$  – соответственно время перемещения транспортного манипулятора от выходного накопителя к устройству 1 и к устройству 2;  $z_9$  – время настройки транспортного манипулятора на выполнение очередного задания;  $z_{10}$  – время настройки робота на выполнение очередного задания.

Входные, выходные и матрица инцидентов НВСП имеет вид:

$$d^- = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$d^+ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

Элементы вектора начальной маркировки:

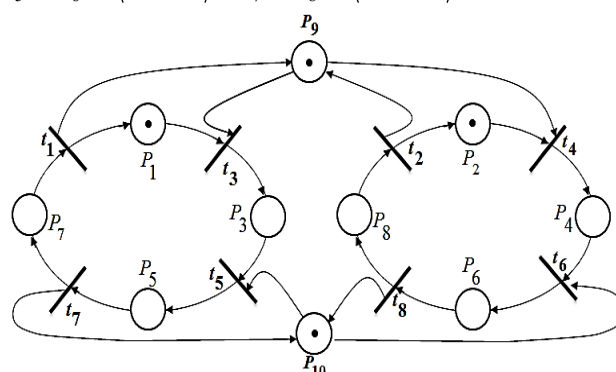
$$\mu_1^0 = \mu_2^0 = \langle 1, 2, 1, 1 \rangle,$$

$$\mu_3^0 = \mu_4^0 = \mu_5^0 = \mu_6^0 = \mu_7^0 = \mu_8^0 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle,$$

$$\mu_9^0 = \langle 2, 3, 1, 1 \rangle, \quad \mu_{10}^0 = \langle 1, 2, 1, 0 \rangle.$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях:  
 $z_1 = z_2 = \langle 2, 3, 1, 1 \rangle$ ,  $z_3 = z_4 = \langle 1, 2, 1, 1 \rangle$ ,  
 $z_5 = z_6 = \langle 2, 3, 0, 1 \rangle$ ,  $z_7 = z_8 = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$ ,  
 $z_9 = \langle 1, 2, 1, 0 \rangle$ ,  $z_{10} = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$ .

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов:  
 $s_1 = s_2 = \langle 2, 3, 1, 1 \rangle$ ,  $s_3 = s_4 = \langle 1, 2, 1, 1 \rangle$ ,  
 $s_5 = s_6 = \langle 1, 2, 0, 1 \rangle$ ,  $s_7 = s_8 = \langle 2, 3, 1, 0 \rangle$ .



Граф-схема модели параллельно функционирующего обрабатывающего устройства

На основе разработанного алгоритма вычисляют структурные элементы НВСП. В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов  $\sigma = (t_3 t_5 t_7 t_1 t_4 t_6 t_8 t_2)$  из начальной маркировки  $\mu'$ :

1) срабатывает переход  $t_3$ , полученная маркировка имеет вид:  
 $\mu_1^1 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  $\mu_2^1 = \langle 3, 5, 2, 2 \rangle$ ,  $\mu_3^1 = \langle 5, 8, 3, 3 \rangle$ ,  
 $\mu_4^1 = \mu_5^1 = \mu_6^1 = \mu_7^1 = \mu_8^1 = \mu_9^1 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  
 $\mu_{10}^0 = \langle 2, 4, 1, 1 \rangle$ ;

2) срабатывает переход  $t_5$ , полученная маркировка имеет вид:  
 $\mu_1^2 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  $\mu_2^2 = \langle 5, 8, 3, 3 \rangle$ ,  
 $\mu_3^2 = \mu_4^2 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ,  $\mu_5^2 = \langle 8, 13, 5, 5 \rangle$ ,  
 $\mu_6^2 = \mu_7^2 = \mu_8^2 = \mu_9^2 = \mu_{10}^2 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle$ ;

3) срабатывает переход  $t_7$ , полученная маркировка имеет вид:



$$\begin{aligned}\mu_1^3 &= \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, & \mu_2^3 &= \langle 7, 11, 4, 4 \rangle, \\ \mu_3^3 &= \mu_4^3 = \mu_5^3 = \mu_6^3 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, & \mu_7^3 &= \langle 11, 18, 6, 7 \rangle, \\ \mu_8^3 &= \mu_9^3 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, & \mu_{10}^3 &= \langle 11, 18, 6, 7 \rangle;\end{aligned}$$

4) срабатывает переход  $t_1$ , полученная маркировка имеет вид:

$$\begin{aligned}\mu_1^4 &= \langle 13, 22, 7, 9 \rangle, & \mu_2^4 &= \langle 9, 14, 5, 5 \rangle, \\ \mu_3^4 &= \mu_4^4 = \mu_5^4 = \mu_6^4 = \mu_7^4 = \mu_8^4 = \langle 0, 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_9^4 &= \langle 13, 22, 7, 9 \rangle, & \mu_{10}^4 &= \langle 12, 20, 6, 8 \rangle.\end{aligned}$$

Процесс продолжается до получения искомой маркировки.

### Заключение

Разработанный алгоритм вычисления структурных элементов НВСП обеспечивает удобные преобразования 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, выявления тупиковых состояний. Программа разработана в системе Borland Delphi 7.0 на основе описанного

алгоритма. Ресурсы современных компьютеров позволяют решать задачи с матрицами достаточно большого размера, что вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемые к моделированию сложных объектов, функционирующих в условиях неопределенности.

### Литература

1. Егоров А.С., Шайкин А.Н. Логическое моделирование в условиях неопределенности на базе нечетких интервальных сетей Петри // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. 2002. № 2. С. 134-139.
2. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems Via Petri Nets and Ordinary Differential Equations. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2015. V. 12. № 1. P. 295-308.
3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 717 с.
4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 284 с.
5. Watanuki K., Murata T. Fuzzy-timing Petri nets model of temperature control for car air conditioning system/Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 12-15, Tokyo, 1999, 4, p. 618-622.
6. Lopez- Mellado E. Analysis of discrete event systems by simulation of timed Petri net models // Mathematics and Computers in Simulation. 2002. Vol. 61. No. 1. p. 53-59.

Поступила 06.04.2018; принята к публикации 14.05.2018

### Информация об авторах

**Мустафаев Валех Азад оглы** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, Сумгаитский государственный университет (AZ5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел. +994505342506, e-mail: valex-sdu@mail.ru

**Салманова Малахат Насиман кызы** - аспирант кафедры информатики, Сумгаитский государственный университет (AZ5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел. +994507562828, e-mail: malaxat\_70@mail.ru

## DEVELOPMENT OF THE MODEL OF OPERATION CENTER FUNCTIONING WITH THE APPLICATION OF THE FUZZY TIMED PETRI NETS

V.A. Mustafayev, M.N. Salmanova

Sumgayit State University, Sumgayit, Republic of Azerbaijan

**Abstract:** the modelling 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 timed Petri nets (PN), representing generalized fuzzy timed PN of a special kind combining deterministic and non-deterministic character. The algorithm is developed for the functioning of fuzzy timed PN. The proposed algorithm provides a solution to the problem of solvability of triggering of transitions occurring in states of conflict, the imposition of a fuzzy structure on the network marking with fuzzy laws of composition that determine the values of the degrees of belonging of the input and output transition positions. The models of dynamic processes are presented in the form specific to fuzzy timed PN. An approach is proposed for modeling dynamic interacting processes based on the matrix theory of PN that provides an effective form of representation of the structure, dynamics of the model state, the space of achievable states, and the sequence of triggering

transitions in the form of a set of vectors and matrices. 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 fuzzy timed PN. A tree graph of accessibility in the form of a sequence of vectors was received as a result of the simulation

**Key words:** model, algorithm, trapezoidal fuzzy interval, fuzzy timed Petri Nets, mechanical processing module

#### References

1. Egorov A.S., Shajkin A.N. "Logical modeling in conditions of uncertainty based on fuzzy interval Petri nets", *Journal of Computer and Systems Sciences International (Izvestiya Akademii Nauk, Teoriya i Sistemy Upravleniya)*, 2002, no. 2, pp.134–139.
2. Ding Z., Zhou Y., Zhou M. "A Polynomial Algorithm to Performance Analysis of Concurrent Systems via Petri Nets and Ordinary Differential Equations", *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, vol. 12, no.1, pp. 295–308.
3. Leonenkov A.V. "Fuzzy modeling in the environments MATLAB and fuzzy TECH", St. Petersburg, BHV–Peterburg, 2005, 717 p.
4. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. "Fuzzy models and networks", Moscow, Telekom, 2012, 284 p.
5. Watanuki K., Murata T. "Fuzzy-timing Petri nets model of temperature control for car air conditioning system", *Proc. of 1999 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, October 12-15*, Tokyo, 1999, vol. 4, pp.618-622.
6. Lopez- Mellado E. "Analysis of discrete event systems by simulation of timed Petri net models", *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, vol. 61, no. 1, pp. 53-59.

Submitted 06.04.2018; revised 14.05.2018

#### Information about the authors

**Valeh Azad oglu Mustafayev**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Informatics of Sumgayit State University (43-th mkr, Sumgayit AZ5001, Azerbaijan), e-mail: valex-sdu@mail.ru

**Malahat Nasiman gizi Salmanova**, Graduate student, Sumgayit State University (43-th mkr, Sumgayit AZ5001, Azerbaijan), e-mail: malaxat\_70@mail.ru