

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
В РОБОТОТЕХНИКЕ И МЕХАТРОНИКЕ**

УДК 519.95

DOI 10.52348/2712-8873\_MMTT\_2021\_7\_75

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ  
ПРОЦЕССОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТРЕУГОЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ  
НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ****М.Н. Салманова<sup>1</sup>, И.С. Будагов<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Сумгаитский государственный университет, Азербайджан, Сумгаит, malaxat\_70@mail.ru*<sup>2</sup>*Гянджинский государственный университет, Азербайджан, Гянджа, ismet.budagov@mail.ru*

*Аннотация.* Рассмотрено моделирование сложных параллельных и распределенных систем, описывающих функционирование динамических объектов в условиях неопределенности. Предложен подход для моделирования сложных распределенных параллельных систем, который базируется на математическом аппарате треугольных нечетких временных сетей Петри (ТНВСП), представляющих расширение обычных сетей Петри с неопределенностью маркировки позиций и переходов. Разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов ТНВСП. На примере модуля параллельно функционирующих обрабатывающих устройств показано, что полученная в результате последовательность срабатывания переходов полностью описывает процесс функционирования ТНВСП. На основе компьютерного эксперимента получена диаграмма достижимости в виде последовательности векторов.

*Ключевые слова:* сеть Петри, моделирование, треугольное нечеткое число, маркировка, механообработка

**MODELING OF DYNAMIC INTERACTION PROCESSES WITH APPLICATION  
OF TRIANGULAR FUZZY TIMED PETRI NETS****M.N. Salmanova<sup>1</sup>, I.S. Budakov<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Sumgayit State University, Azerbaijan, Sumgayit, malaxat\_70@mail.ru*<sup>2</sup>*Ganja State University, Azerbaijan, Ganja, ismet.budagov@mail.ru*

*Abstract.* The complex parallel and distributed systems modeling describing the of dynamic objects functioning under uncertainty conditions is considered. An approach is proposed for modeling complex distributed parallel systems, which is based on mathematical apparatus of triangular fuzzy timed Petri nets (TFTPN), which is an extension of ordinary Petri nets (PN) with uncertainty in marking positions and transitions. An algorithm for the functioning and calculation of the structural elements of TFTPN is developed. Using an example of of parallel-functioning processing devices module, it is shown that, as a result, the obtained sequence of transition triggering fully describes the process of functioning TFTPN. Based on a computer experiment, an reachability diagram is obtained in the form of a sequence of vectors.

*Keywords:* Petri nets, modeling, triangular fuzzy number, marking, machining

**Введение.** Сети Петри (СП) и их различные расширения являются эффективным моделирующим математическим аппаратом, достоинством которых является возможность представления структуры и анализа динамики состояний сложных распределенных параллельных систем [1–3]. Достоинствами различных подклассов СП являются простота, наглядность и наличие хорошо развитых аналитических возможностей. Конструкции СП представляют сетевую модель для описания и анализа динамики функционирования систем в виде «события-действие, причина-следствие». Основное преимущество СП и их расширения для моделирования динамических взаимодействующих процессов заключается в том, что предметная область моделируется СП, и в результате анализа структуры моделей в независимости от реального объекта, в «online» режиме осуществляется оценка целесообразности предлагаемого проектного решения компьютерными экспериментами.

Одной из важнейших областей применения СП являются моделирование и управление дискретных объектов. Здесь аппарат СП используется на стадии проектирования системы управления и при создании алгоритмической основы

управления объекта. Причем СП имеют возможность отображать параллелизм [4], асинхронность и иерархичность моделируемых систем. При проектировании и управлении систем СП применяется как вспомогательный инструмент анализа. При этом используются общепринятые методы проектирования систем, и в результате анализа основных свойств сети осуществляется оценка целесообразности проекта. Процесс проектирования носит итерационный характер, в случае отрицательного результата модифицированный проект вновь моделируется СП и анализируется до тех пор, пока не достигаются желаемые результаты. Преимущество подхода заключается в том, что его можно использовать для анализа существующих систем. К недостаткам выразительных возможностей подклассов СП относятся их непригодность к моделированию событий с приоритетами и отсутствие возможности представления структуры и динамики функционирования систем в условиях неопределенности.

Различные обобщения СП [5] являются мощным аппаратом моделирования синхронных, асинхронных, параллельных распределенных и недетерминированных динамических взаимодействующих процессов.

Существующие проблемно-ориентированные расширения СП используются для описания неопределенности срабатывания переходов, находящихся в состоянии конфликта [3, 6]. При этом каждому элементу множества разрешенных последовательностей переходов приписывается некоторая вероятность. Второй вариант описывает неопределенность наличие маркеров в позициях сети. Множество позиций СП моделируют состояние отдельных элементов системы, количество маркеров во всех позициях, определяют глобальное состояние моделируемого объекта [7, 8]. Неопределенность количества маркеров, находящихся во входных и выходных позициях СП, задается функциями распределения вероятности и степени принадлежности. В связи с этим, в представленной работе рассмотрено моделирование динамических взаимодействующих процессов с применением ТНВСП с неопределенностью маркировки позиций. Разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов ТНВСП.

**Правила срабатывания переходов и алгоритм функционирования треугольных нечетких временных сетей Петри.** При решении практических задач нечеткого моделирования наибольшее применение нашли простейшие частные случаи нечетких чисел и интервалов, получившие название по виду их функций принадлежности. Нечеткое моделирование основывается на теории нечетких множеств и нечеткую логику. 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 выбраны как структурные элементы модели. При этом целесообразность использования трапециевидных нечетких интервалов и треугольных нечетких чисел обуславливается не только простотой выполнения операций над ними, но и их наглядной графической интерпретацией.

Треугольным нечетким числом (ТНЧ) называют такое нормальное нечеткое число, функция принадлежности которого может быть задана треугольной функцией. В этом случае ТНЧ представляют в виде кортежа из трех чисел:  $A = \langle a, \alpha, \beta \rangle$ , где  $a$  – модальное значение ТНЧ;  $\alpha$  и  $\beta$  левый и правый коэффициенты нечеткости ТНЧ [9].

Для решения задач нечеткого моделирования необходимо определить некоторые операции над ТНЧ, аналогичные арифметическим операциям над обычными числами и интервалами. Для определения аналогов обычных арифметических операций над нечеткими числами и нечеткими интервалами используются принцип обобщения [10].

Модель динамических взаимодействующих процессов представляется в виде ТНВСП. Здесь ТНВСП определяется выражением  $C_T = (N, \mu_0, Z_\Delta, S_\Delta)$ , где  $N = (P, T, I, O)$  – структура ТНВСП:  $P = \{p_i\}, (i = 1, \dots, n \leftrightarrow; n \text{ – число позиций})$  – множество позиций;  $T = \{t_j\}, (j = 1, \dots, m; m \text{ – число переходов})$  – множество переходов;  $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\} \leftrightarrow \leftrightarrow \leftrightarrow$ ;  $O: T \times P \rightarrow \{0, 1\}$  – 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 треугольное нечеткое число:

$$\mu_i^0 = \langle \mu_{i1}^0, \mu_{i2}^0, \mu_{i3}^0 \rangle (i \in \{1, 2, \dots, n\}),$$

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

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

$s = (s_1, s_2, \dots, s_m)$  – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов ТНВСП, каждый компонент  $s_j$  который представляет й ТНЧ:

$$s_j = \langle s_{j1}, s_{j2}, s_{j3} \rangle, (j \in \{1, 2, \dots, m\}).$$

Текущее состояние ТНВСП определяется вектором  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , компоненты которого представляет ТНЧ  $\mu_i = \langle \mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\})$  и интерпретируется как значения функции принадлежности нечеткого наличия одного маркера в соответствующих позициях  $p_i \in P$  относительно времени, отсчитываемого от момента запуска данной ТНВСП.

Переход  $t_k \in T$  ТНВСП называется разрешенным, при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , если выполнено следующее условие

$$\mu_i = \langle \mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3} \rangle > 0 / (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0).$$

Если переход  $t_k \in T$  ТНВСП разрешен при некоторой доступной маркировке  $\mu$ , то нечеткое срабатывание данного перехода, осуществляемое за время  $s_k = \langle s_{k1}, s_{k2}, s_{k3} \rangle$  приводит к новой маркировке  $\mu_k$ , компоненты вектора которой определяется следующим образом:

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

$$\mu'_k = \langle \mu'_{k1}, \mu'_{k2}, \mu'_{k3} \rangle = \langle 0, 0, 0 \rangle / (\forall p_i \in P) \wedge (I(p_i, t_k) > 0) \quad (1)$$

– для каждой из выходных позиций  $p_j \in P$  для которых  $O(t_k, p_j) > 0$ , по формуле:

$$\mu'_j = \min\{\max\{\mu_i\} + s_k, \mu_j\} \quad (2)$$

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

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

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

– для каждой позиции  $p_i \in P$ , не являющейся входной и выходной по формуле:

$$\mu'_i = \langle \mu'_{i1}, \mu'_{i2}, \mu'_{i3} \rangle = \langle \mu_{i1}, \mu_{i2}, \mu_{i3} \rangle,$$

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

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 (1), затем по формуле (2).

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

$$\mu'_i = \mu_i + z_i / (\forall p_i \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0) \wedge (\mu_j \neq \langle 0, 0, 0 \rangle).$$

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

Алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов ТНВСП. Элементы матриц входных  $d_{ij}^-$ , выходных  $d_{ij}^+$  позиций и инцидентов  $d_{ij}$  определяется следующим образом [11]:

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

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

*Начало алгоритма*

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

*Шаг. 2.* Определение и ввод элементов вектора начальной маркировки  $\mu$ :

*Шаг. 3.* Определение и ввод элементов вектора параметров временных задержек маркеров в позициях  $z$ :  $z_i = \langle z_{i1}, z_{i2}, z_{i3} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, n\})$ .

*Шаг. 4.* Определение и ввод элементов вектора параметров времен срабатывания переходов  $s$ :  $s_i = \langle s_{i1}, s_{i2}, s_{i3} \rangle, (i \in \{1, 2, \dots, m\})$ .

*Шаг. 5.* Вычисления воздействия параметров временных задержек маркеров в позициях:  $\mu_{ir} = \mu_{ir} + z_{ir} (i = \overline{1, n}; r = \overline{1, 3})$

*Шаг. 6.* Создание промежуточной матрицы  $\mu_{ir}^1$ :  $\mu_{ir}^1 = \mu_{ir}; (i = \overline{1, n}; r = \overline{1, 3})$ .

*Шаг. 7.* Полагают:  $k = 1$ .

*Шаг. 8.* Полагают:  $j = 1$ ;

*Шаг. 9.* Определение разрешенного перехода:

9.1. Если для  $d_{ji}^- \neq 0, (i = \overline{1, n})$ , выполняется условие  $\mu_{ir}^1 = 0, (r = \overline{1, 3})$ , то индекс  $j$  увеличивается на единицу:  $j = j + 1$  и осуществляется переход к шагу 14;

9.2. Определение расширенного максимума для всех входных позиций разрешенного перехода  $j$ : полагают  $max_1 = 0; max_2 = 0; max_3 = 0$ ; для всех  $d_{ji}^- \neq 0, (i = \overline{1, n})$  выполняются:

9.2.1. Если  $\mu_{i1}^1 > max_1$ , тогда  $m_1 = \mu_{i1}^1$ ;

9.2.2. Если  $\mu_{i1}^1 - \mu_{i2}^1 > max_1 - max_2$ , тогда  $m_2 = \mu_{i1}^1 - \mu_{i2}^1$ , в противном случае  $m_2 = max_1 - max_2$ ;  $m_2 = m_1 - m_2$ ;

9.2.3. Если  $\mu_{i1}^1 + \mu_{i3}^1 > max_1 + max_3$ , тогда  $m_3 = \mu_{i1}^1 + \mu_{i3}^1$ , в противном случае  $m_3 = max_1 + max_3$ ;  $m_3 = m_3 - m_1$ ;

9.2.4. Присваивают:  $max_1 = m_1; max_2 = m_2; max_3 = m_3$ ;

9.2.5. Обнулирование элементов вектора  $\mu^1$ :  $\mu_{ir}^1 = 0 (r = \overline{1, 3})$  для всех  $d_{ji}^- \neq 0, (i = \overline{1, n})$ .

*Шаг. 10.* Определение расширенного минимума для всех выходных позиций разрешенного перехода  $j$ : если для всех  $d_{ji}^+ \neq 0, (i = \overline{1, n})$ , выполняется условие  $(\mu_{i1}^1 \neq 0) \vee (\mu_{i2}^1 \neq 0) \vee (\mu_{i3}^1 \neq 0)$ , то вычисляют:

10.1  $\mu_{i1}^1 = max_1 + s_{j1}; \mu_{i2}^1 = max_2 + s_{j2}; \mu_{i3}^1 = max_3 + s_{j3}$ ;

10.2. Если  $\mu_{i1}^1 < \mu_{i1}$ , тогда  $m_1 = \mu_{i1}^1$ , в противном случае  $m_1 = \mu_{i1}$ ;

10.3. Если  $\mu_{i1}^1 - \mu_{i2}^1 < \mu_{i1} - \mu_{i2}$ , тогда  $m_2 = \mu_{i1}^1 - \mu_{i2}^1$ , в противном случае  $m_2 = \mu_{i1} - \mu_{i2}$ ;  $m_2 = m_1 - m_2$ ;

10.4. Если  $\mu_{i1}^1 + \mu_{i3}^1 < \mu_{i1} + \mu_{i3}$ , тогда  $m_3 = \mu_{i1}^1 + \mu_{i3}^1$ , в противном случае  $m_3 = \mu_{i1} + \mu_{i2}$ ;  $m_3 = m_3 - m_1$ ;

10.5. Присваивают:  $\mu_{i1}^1 = m_1$ ;  $\mu_{i2}^1 = m_2$ ;  $\mu_{i3}^1 = m_3$ ;

Шаг. 11. Если выполняется условие  $(\mu_{i1}^1 \neq 0) \vee (\mu_{i2}^1 \neq 0) \vee (\mu_{i3}^1 \neq 0)$ , для позиций  $d_{ji}^+ \neq 0, (i = \overline{1, n})$ , тогда вычисляется воздействия параметров временных задержек маркеров в выходных позициях:  $\mu_{ir}^1 = \mu_{ir}^1 + z_{ir} (r = \overline{1, 3})$ ;

Шаг. 12. Новая маркировка принимается за текущую:  $\mu_{ir} = \mu_{ir}^1; (i = \overline{1, n}; r = \overline{1, 3})$ .

Шаг. 13. Значение  $k$  увеличивается на единицу:  $k = k + 1$ . По выбору пользователя процесс завершается и осуществляется переход к концу алгоритма или процесс продолжается и осуществляется переход шагу 8.

Шаг. 14. Если выполняется условие  $j \leq m$  то осуществляется переход к шагу 9.1, в противном случае объявляется о тупиковой ситуации.

*Конец алгоритма.*

**Модель параллельно функционирующих обрабатывающих устройств в производственной системе механообработки.** Рассмотрим модель функционирования модуля «обрабатывающий центр» в гибкой производственной системе механообработки. Обрабатывающий центр состоит из одного персональных входных накопителей для необработанных деталей; из устройства 1 и устройства 2, выполняющих две различные операции над деталью; из промышленного робота, выполняющего загрузки-разгрузки устройства 1 и устройства 2, соответственно, и из персональных выходных накопителей для обработанных деталей. Связь модуля с предыдущим и последующим модулями происходит соответственно с помощью вышеуказанных накопителей.

Модуль работает следующим образом: детали поступают на входной накопитель и ожидают обработку; при наличии деталей на входном накопителе робот-манипулятор осуществляет загрузку в устройство 1 одной детали, после её обработки устройство 1 разгружается роботом, и осуществляется загрузка устройства 2 этой деталью, после её обработки устройством 2, робот его разгружает и помещает деталь в выходной накопитель и цикл повторяется.

В представленной модели, составленной с применением ТНВСП (рис. 1), состояния модуля обрабатывающего центра описываются следующими позициями:

$p_1$  и  $p_2$  – соответственно готовность промышленного робота к обслуживанию устройства 1 и устройства 2;  $p_3$  и  $p_8$  – соответственно входные накопители устройства 1 и устройства 2;  $p_4$  и  $p_9$  – соответственно начальные состояния устройства 1 и устройства 2;  $p_5$  и  $p_{10}$  – соответственно готовность устройства 1 и устройства 2 к выполнению операций с одной деталью;  $p_6$  и  $p_{11}$  – соответственно конечные состояния устройства 1 и устройства 2;  $p_7$  и  $p_{12}$  – соответственно выходные накопители устройства 1 и устройства 2.

Возможные события в модуле обрабатывающего центра описываются следующими переходами:

$t_1$  и  $t_4$  – соответственно выполнение загрузки устройства 1 и устройства 2;  $t_2$  и  $t_5$  – соответственно обработка детали устройством 1 и устройством 2;  $t_3$  и  $t_6$  – соответственно выполнение роботом разгрузки устройства 1 и устройства 2;  $t_7$  – транспортировка детали из устройства 1 к устройству;  $t_8$  – перемещение руки промышленного робота от устройства 2 к устройству 1.

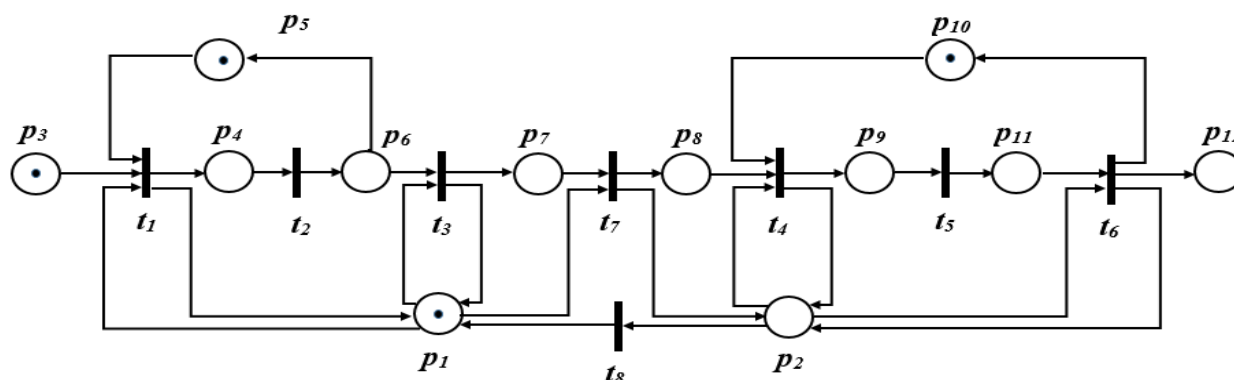


Рис. 1. Граф модели ТНВСП «обрабатывающий центр» в гибкой производственной системе механообработки

Время задержек событий в модуле обрабатывающего центра описываются следующими параметрами:

$z_1$  и  $z_2$  – соответственно время настройки промышленного робота для обслуживания устройства 1 и устройства 2;  $z_3$  и  $z_8$  – соответственно время настройки входных накопителей устройства 1 и устройства 2;  $z_4$  и  $z_9$  – соответственно время наладки устройства 1 и устройства 2;  $z_5$  и  $z_{10}$  – соответственно время готовности для выполнения обработки над деталью устройства 1 и устройства 2;  $z_6$  и  $z_{11}$  – соответственно время переналадки устройства 1 и устройства 2;  $z_7$  и  $z_{12}$  – соответственно время настройки выходных накопителей устройства 1 и устройства 2;

Время выполнения операций в модуле обрабатывающего центра описываются следующими параметрами:

$s_1$  и  $s_4$  – соответственно время выполнения загрузки роботом устройства 1 и устройства 2;  $s_2$  и  $s_5$  – соответственно время обработки детали устройством 1 и устройством 2;  $s_3$  и  $s_6$  – соответственно время выполнения разгрузки роботом устройства 1 и устройства 2;  $s_7$  – время транспортировки детали из выхода устройства 1 к выходу устройства 2;  $s_8$  – время перемещения робота манипулятора от устройства 2 к устройству 1.

Функция инцидентности множества позиций и множества переходов представляются соответственно с матрицами  $D^-(8,12)$  и  $D^+(8,12)$ :

$$D^-(8,12) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D^+(8,12) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Начальная маркировка представляется вектором:

$$\mu_1^0 = \langle 2, 0, 1 \rangle, \mu_2^0 = \langle 3, 0, 1 \rangle, \mu_3^0 = \langle 5, 2, 1 \rangle, \mu_4^0 = \langle 4, 1, 1 \rangle, \mu_5^0 = \langle 5, 2, 1 \rangle, \\ \mu_6^0 = \langle 7, 2, 3 \rangle, \mu_7^0 = \langle 3, 1, 0 \rangle, \mu_8^0 = \langle 2, 0, 0 \rangle, \mu_9^0 = \langle 5, 0, 1 \rangle, \mu_{10}^0 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{11}^0 = \langle 6, 3, 4 \rangle, \\ \mu_{12}^0 = \langle 4, 1, 3 \rangle.$$

Элементы вектора параметров временных задержек маркеров в позициях:

$$z_1 = \langle 7, 2, 3 \rangle, z_2 = \langle 5, 1, 2 \rangle, z_3 = \langle 4, 1, 0 \rangle, z_4 = \langle 8, 3, 4 \rangle, z_5 = \langle 4, 1, 2 \rangle, z_6 = \langle 5, 2, 1 \rangle, \\ z_7 = \langle 3, 1, 0 \rangle, z_8 = \langle 7, 3, 1 \rangle, z_9 = \langle 9, 0, 0 \rangle, z_{10} = \langle 4, 2, 1 \rangle, z_{11} = \langle 6, 2, 2 \rangle, z_{12} = \langle 3, 1, 2 \rangle.$$

Элементы вектора параметров времен срабатывания разрешенных переходов:

$$s_1 = \langle 6, 2, 3 \rangle, s_2 = \langle 7, 1, 2 \rangle, s_3 = \langle 5, 2, 1 \rangle, s_4 = \langle 6, 2, 3 \rangle, s_5 = \langle 8, 3, 4 \rangle, s_6 = \langle 5, 2, 1 \rangle, \\ s_7 = \langle 6, 1, 1 \rangle, s_8 = \langle 7, 2, 3 \rangle.$$

На основе разработанного алгоритма определяется структура ТНВСП. В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывающих переходов  $\sigma = (t_1 t_2 t_3 t_7 t_4 t_5 t_6 t_8)$  из начальной маркировки  $\mu_0$ . В результате симуляции получено дерево достижимости в виде последовательности векторов срабатывания разрешенных переходов; получена последовательность векторов маркировок. Изменения маркировок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Изменения маркировок

Срабатываемые переходы	Изменения маркировок
$t_1$	$\mu_1^1 = \langle 16, 4, 7 \rangle, \mu_2^1 = \langle 8, 1, 3 \rangle, \mu_3^1 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^1 = \langle 20, 7, 9 \rangle, \mu_5^1 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_6^1 = \langle 12, 4, 4 \rangle, \\ \mu_7^1 = \langle 6, 2, 0 \rangle, \mu_8^1 = \langle 9, 3, 1 \rangle, \mu_9^1 = \langle 14, 0, 1 \rangle, \mu_{10}^1 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{11}^1 = \langle 12, 5, 6 \rangle, \mu_{12}^1 = \langle 7, 2, 5 \rangle$
$t_2$	$\mu_1^2 = \langle 16, 4, 7 \rangle, \mu_2^2 = \langle 8, 1, 3 \rangle, \mu_3^2 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^2 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^2 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_6^2 = \langle 17, 6, 5 \rangle, \\ \mu_7^2 = \langle 6, 2, 0 \rangle, \mu_8^2 = \langle 9, 3, 1 \rangle, \mu_9^2 = \langle 14, 0, 1 \rangle, \mu_{10}^2 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{11}^2 = \langle 12, 5, 6 \rangle, \mu_{12}^2 = \langle 7, 2, 5 \rangle$
$t_3$	$\mu_1^3 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_2^3 = \langle 8, 1, 3 \rangle, \mu_3^3 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^3 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^3 = \langle 26, 8, 9 \rangle, \mu_6^3 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_7^3 = \langle 9, 3, 0 \rangle, \mu_8^3 = \langle 9, 3, 1 \rangle, \mu_9^3 = \langle 14, 0, 1 \rangle, \mu_{10}^3 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{11}^3 = \langle 12, 5, 6 \rangle, \mu_{12}^3 = \langle 7, 2, 5 \rangle$
$t_7$	$\mu_1^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_2^4 = \langle 48, 10, 18 \rangle, \mu_3^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^4 = \langle 26, 8, 9 \rangle, \mu_6^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_7^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_8^4 = \langle 50, 12, 17 \rangle, \mu_9^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{10}^4 = \langle 65, 22, 30 \rangle, \mu_{11}^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{12}^4 = \langle 13, 4, 9 \rangle$
$t_4$	$\mu_1^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_2^4 = \langle 48, 10, 18 \rangle, \mu_3^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^4 = \langle 26, 8, 9 \rangle, \mu_6^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_7^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_8^4 = \langle 50, 12, 17 \rangle, \mu_9^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{10}^4 = \langle 65, 22, 30 \rangle, \mu_{11}^4 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{12}^4 = \langle 13, 4, 9 \rangle$
$t_5$	$\mu_1^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_2^5 = \langle 53, 11, 20 \rangle, \mu_3^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^5 = \langle 26, 8, 9 \rangle, \mu_6^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_7^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_8^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_9^5 = \langle 80, 24, 33 \rangle, \mu_{10}^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{11}^5 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{12}^5 = \langle 13, 4, 9 \rangle$
$t_6$	$\mu_1^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_2^6 = \langle 53, 11, 20 \rangle, \mu_3^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^6 = \langle 26, 8, 9 \rangle, \mu_6^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_7^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_8^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_9^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{10}^6 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{11}^6 = \langle 94, 29, 39 \rangle, \mu_{12}^6 = \langle 13, 4, 9 \rangle$
$t_8$	$\mu_1^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_2^7 = \langle 58, 12, 22 \rangle, \mu_3^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_4^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_5^7 = \langle 26, 8, 9 \rangle, \mu_6^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \\ \mu_7^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_8^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_9^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{10}^7 = \langle 103, 33, 41 \rangle, \mu_{11}^7 = \langle 0, 0, 0 \rangle, \mu_{12}^7 = \langle 16, 5, 11 \rangle$

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

**Закключение.** Разработан алгоритм функционирования и вычисления структурных элементов ТНВСП. Разработанный алгоритм обеспечивает: моделирование сложных распределенных параллельных систем, функционирующих в условиях нечеткости и неопределенности; преобразование внешних данных во внутренний формат, используемый в среде моделирования; сокращение числа входных и выходных позиций переходов и размерности пространства достижимых состояний; разрешение срабатывания возбужденных переходов, находящихся в состоянии конфликта, и автоматическое выявление тупиковых ситуаций.

На основе предложенного алгоритма разработана модель функционирующих обрабатывающих устройств в производственной системе механообработки. Результаты компьютерных экспериментов подтверждают, что предложенный подход и разработанный алгоритм позволяют моделировать реальные распределенные системы, функционирующие в условиях неопределенности.

## Библиографический список

1. Kai-Qing Zhou ID, Wei-Hua Gui, Li-Ping Mo and Azlan Mohd Zain. A Bidirectional Diagnosis Algorithm of Fuzzy Petri Net Using Inner-Reasoning-Path // *Symmetry*. 2018. Vol. 10. Iss. 6. pp. 192.
2. Kai-Qing Zhou, Azlan Mohd Zain, Li-ping Mo. Dynamic properties of fuzzy Petri net model and related analysis // *Journal of Central South University*, Volume 22, Issue 12, December 2015. 2015. pp. 4717–4723.
3. Kai-Qing Zhou, Azlan Mohd Zain. Fuzzy Petri nets and industrial applications // *Artificial Intelligence Review*. 2015. Vol. 45(4). pp. 1–42.
4. Емельянова Г.М., Смирнова Е.И. Сети Петри в задачах моделирования сложных систем. Нечеткая сеть Петри. М.: 2002. 264 с.
5. Блюмин С.Л., Шмырин А.М., Седых И.А., Филоненко В.Ю. Окрестное моделирование сетей Петри: монография. Липецк. ЛЕГИ. 2010. 124 с.
6. Maurizio Bevilacqua, Filippo Emanuele Ciarapica, Mazzuto Giovanni. Timed coloured petri nets for modelling and managing processes and projects / 11<sup>TH</sup> CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '17. 2018. Vol. 67. pp. 58–62.
7. Xue-Guo Xu, Hua Shi, Dong-Hui Xu, Hu-Chen Liu. Picture Fuzzy Petri Nets for Knowledge Representation and Acquisition in Considering Conflicting Opinions // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9 (5).
8. Yang B., Li H. A novel dynamic timed fuzzy Petri nets modeling method with applications to industrial processes // *Expert System with Applications* 97. 2018. pp. 276–289.
9. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. БХВ–Петербург. Санкт–Петербург. 2005. 717 с.
10. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. Телеком. Москва. 2012. 284 с.
11. Akhmedov M.A., Mustafayev V.A. Development of fuzzy model for investigation functioning active elements of the flexible manufacture // *Proc. 9-th Internat. Conf. On Application of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS-2010)* Prague. Czech Republic. August 26-27. 2010. b-Quadrat Verlag, pp. 315-320.