

**Суконщиков Алексей Александрович**  
Кандидат технических наук, доцент,  
Вологодский государственный университет  
(Вологда, Россия)  
E-mail: aas313@mail.ru

**Sukonshchikov Aleksei Aleksandrovich**  
PhD in Technology, Associate Professor,  
Vologda State University  
(Vologda, Russia)  
E-mail: aas313@mail.ru

**Швецов Анатолий Николаевич**  
Доктор технических наук, профессор,  
Вологодский государственный университет  
(Вологда, Россия)  
ORCID 0000-0002-7021-5184  
E-mail: smithv@mail.ru

**Shvetsov Anatolii Nikolaevich**  
Doctor of Technology, Professor,  
Vologda State University  
(Vologda, Russia)  
ORCID 0000-0002-7021-5184  
E-mail: smithv@mail.ru

**Улитин Анатолий Вячеславович**  
Аспирант,  
Вологодский государственный университет  
(Вологда, Россия)  
E-mail: avt@vogu35.ru

**Ulitin Anatolii Viacheslavovich**  
Postgraduate student,  
Vologda State University  
(Vologda, Russia)  
E-mail: avt@vogu35.ru

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ  
НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF  
NEURO-FUZZY PETRI NETS**

**Аннотация.** В статье рассматривается новый вариант модификации математического формализма сетей Петри – модифицированные нейро-нечеткие сети Петри (МННСП), аккумулирующие возможности и свойства раскрашенных, нечетких, временных, приоритетных и нейронных сетей. Приводится математическое определение аппарата МННСП и содержания его функции. На базе предложенного формализма МННСП строятся модели хранения и использования деловых остатков металла на складе. Приводятся результаты имитационных экспериментов и анализ полученных данных.

**Ключевые слова:** нейро-нечеткая сеть Петри, нечеткие модели, модель склада, деловые остатки, имитационные эксперименты

**Abstract.** The article discusses a new modification version of the Petri nets mathematical formalism – modified neuro-fuzzy Petri nets (MNFPN), accumulating the capabilities and properties of colored, fuzzy, temporal, priority and neural networks. The authors give a mathematical definition of the MNFPN apparatus and the content of its function. On the basis of the proposed MNFPN formalism, models for the storage and use of metal residues in the warehouse are built. The results of simulation experiments and analysis of the results obtained are presented.

**Keywords:** neuro-fuzzy Petri net, fuzzy models, warehouse model, useful residues, simulation experiments

---

**Благодарность.** Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-01-00103 А «Модели и методы построения информационно-телекоммуникационных систем на основе сообществ самоорганизующихся нейро-нечетких интеллектуальных агентов» и проект № 18-47-350001 п-а «Модели и методы построения ней-

ро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах»).

### Введение

Задачи адекватного представления взаимодействующих динамических нечетких процессов, оптимизации ресурсов и выбора альтернатив развития производственных и организационных систем с учетом множества ограничений являются важными и актуальными и во многих случаях не имеют точных аналитических решений<sup>1</sup>.

В данной работе исследуются способы моделирования сложных дискретных систем, состоящих из множества различных взаимодействующих подсистем, в которых присутствует нечеткость исходных данных. Значительную сложность представляет моделирование подобных систем, включающих большое количество элементов, аналитическими методами, поэтому применяется имитационный подход, базирующийся на использовании предлагаемых авторами модификаций сетей Петри<sup>2</sup>.

При работе с системой поддержки принятия решений (СППР) лицу, принимающему решения (ЛПР), важно знать и понимать логику формирования решения СППР, поэтому используемый системой математический аппарат должен обладать свойствами наглядности и интерпретируемости. Представить наглядную структуру процесса принятия решений в виде двудольного графа позволяют сети Петри. В данной работе модели реализуются в виде сетей Петри различных расширений. К достоинствам этого математического аппарата можно отнести удобство программирования на ЭВМ, итерационность и значительный потенциал в распараллеливании алгоритмов решения задач<sup>3</sup>.

Предлагаемая авторами интерпретация сетей Петри обладает свойствами раскрашенных, нечетких, временных, приоритетных и нейронных сетей. Раскрашенные сети Петри позволяют осуществлять классификацию входных данных по большому количеству разнородных признаков, которые могут иметь взаимозависимости. Поскольку СППР должна учитывать неопределенность и неточность, то необходимо,

---

<sup>1</sup> Демидова Л. А., Кираковский В. В., Пылькин А. Н. Принятие решений в условиях неопределенности. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2016. – 289 с.; Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Исследование процессов в многоуровневых системах поддержки принятия решений. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2019. – 151 с.

<sup>2</sup> Крюкова Д. Ю., Суконщиков А. А. Системы поддержки принятия решений на базе аппарата сетей Петри // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2008. – № 3. – С. 45–49; Улитин А. В., Суконщиков А. А. Применение аппарата нейро-нечетких сетей Петри для моделирования СППР // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции (Курск, 19–20 марта 2015 г.). – Курск: Университетская книга, 2015. – С. 160–163.

<sup>3</sup> Бодянский Е. В., Кучеренко Е. И., Михалев А. И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем. – Днепрпетровск: Системные технологии, 2005. – 311 с.; Суконщиков А. А. Концепция системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2017): материалы IX Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Х. С. Леденцова (Вологда, 30 июня – 01 июля 2017 г.). – Вологда: ВоГУ, 2017. – С. 160–164.

чтобы используемое расширение аппарата сетей Петри обладало и элементами нечеткой логики. Наличие нечетких переходов позволяет моделировать процесс нечеткого вывода и строить систему на основе нечетких продукционных правил. Нечеткая сеть Петри типа Cf получается в результате введения нечеткости в начальную маркировку и правила срабатывания переходов<sup>1</sup>.

Свойства временных сетей Петри в разрабатываемом расширении позволяют получить не только количественные, но и временные характеристики моделируемых процессов, а свойства приоритетных сетей – регулировать порядок срабатывания активных переходов. Нейронная составляющая дает возможность классифицировать объекты на основании определенных групп параметров.

### Основная часть

#### 1. Формальное описание модифицированных нейро-нечетких сетей Петри

Разрабатываемый аппарат модифицированных нейро-нечетких сетей Петри (МННСП) обеспечивает возможность использования меток со сложной структурой, использование комбинированных условий срабатывания переходов, получение комплексной оценки статистических и динамических свойств моделей, задание временных задержек позициям и переходам, задание параметров модели в нечетком виде и контроль порядка срабатывания переходов.

Авторами предлагается модифицированное расширение сетей Петри (МННСП) на базе нейронных (НРСП), нечетких (НСП), раскрашенных (РСП), временных и приоритетных сетей Петри. Перед формальным описанием МННСП определим необходимые элементы данного формализма. Тип элемента в МННСП – это множе-

ство, которое содержит значения для данного типа  $T = (t_1, t_2, \dots, t_n) : n \in N$ . Тип переменной  $v$  или выражения  $e$  обозначается как  $Type(v)$  и  $Type(e)$  соответственно. Множество переменных в выражении  $e$  обозначается как  $Var(e)$ . Означивание множества переменных  $V$  – это соответствие каждой переменной  $v \in V$  некоторого элемента  $b(v) \in Type(v)$ .

Формально ННСП можно представить в виде следующей структуры:  $MPN = (\Sigma, P, T, A, N, C, G, E, I, f, \lambda, m_0, PR, FR, Z, D, Q, s, n, g)$ , где:

1)  $\Sigma$  – конечное множество типов. Для нейронной сети  $\Sigma_N = \{a, b\}$ , где  $a$  – метки с положительным потенциалом,  $b$  – метки с отрицательным потенциалом,  $\Sigma_N \in \Sigma$ ;

2)  $P$  – конечное множество позиций, такое что  $P = P_C \cup P_f \cup P_N$ , где  $P_C$  – конечное множество позиций РСП,  $P_f$  – конечное множество позиций НСП,  $P_N$  – конечное множество позиций НРСП, при этом  $P_C \cap P_f \cap P_N = \emptyset$ ;

3)  $T$  – конечное множество переходов, такое что

$$T = T_C \cup T_f \cup T_N \cup T_{Cf} \cup T_{CN} \cup T_{fC} \cup T_{fN} \cup T_{NC} \cup T_{Nf},$$

<sup>1</sup> Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Швецов А. Н. Нечеткие и нейронные сети Петри. – Курск: Университетская книга, 2019. – 209 с.

где  $T_C$  – конечное множество переходов РСП,  $T_f$  – конечное множество переходов НСП,  $T_N$  – конечное множество переходов ННСП,  $T_{Cf}$  – конечное множество переходов из позиций РСП в позиции НСП,  $T_{CN}$  – конечное множество переходов из позиций РСП в позиции НРСП,  $T_{fC}$  – конечное множество переходов из позиций НСП в позиции РСП,  $T_{fN}$  – конечное множество переходов из позиций НСП в позиции НРСП,  $T_{NC}$  – конечное множество переходов из позиций НРСП в позиции РСП,  $T_{Nf}$  – конечное множество переходов из позиций НСП в позиции НРСП, при этом множества являются попарно непересекающимися;

4)  $A$  – конечное множество дуг;

5)  $N$  – функция инцидентности

$$N : A \rightarrow A_C \cup A_f \cup A_N \cup A_{Cf} \cup A_{CN} \cup A_{fC} \cup A_{fN} \cup A_{NC} \cup A_{Nf};$$

$$A_C = P_C \times T_C \cup T_C \times P_C;$$

$$A_f = P_f \times T_f \cup T_f \times P_f;$$

$$A_N = P_N \times T_N \cup T_N \times P_N;$$

$$A_{Cf} = P_C \times T_{Cf} \cup T_{Cf} \times P_f;$$

$$A_{CN} = P_C \times T_{CN} \cup T_{CN} \times P_N;$$

$$A_{fC} = P_f \times T_{fC} \cup T_{fC} \times P_C;$$

$$A_{fN} = P_f \times T_{fN} \cup T_{fN} \times P_N;$$

$$A_{NC} = P_N \times T_{NC} \cup T_{NC} \times P_C;$$

$$A_{Nf} = P_N \times T_{Nf} \cup T_{Nf} \times P_f;$$

6)  $C$  – функция определения типа позиции  $C : P_C \rightarrow \Sigma$ ;

7)  $G$  – функция, устанавливающая каждому переходу охранные выражения, такие что  $\forall t \in T_C : [Type(G(t)) \wedge Type(Var(G(t))) \subseteq \Sigma]$ ;

8)  $E$  – функция, которая присваивает каждой дуге выражение, такое что  $\forall a \in A_C : [Type(E(a)) = C(p)_{ms} \wedge Type(Var(E(a))) \subseteq \Sigma]$ ,  $p$  – инцидентная дуге позиция;

9)  $I$  – функция инициализации (начальной маркировки), которая присваивает каждой позиции РСП тривиальное выражение, такое что

$$\forall p \in P_C : [Type(I(p)) = C(p)_{ms}];$$

10)  $f_j = (f_1, f_2, \dots, f_n)$  – вектор значений функции принадлежности нечеткого срабатывания переходов  $t_i \in T_f$  НСП, при этом  $f_j \in [0, 1](\forall j \in \{1, 2, \dots, n\})$ ;

11)  $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  – вектор значений порога срабатывания переходов  $t_i \in T_f$  НСП, при этом  $\lambda_j \in [0, 1](\forall j \in \{1, 2, \dots, n\})$ ;

12)  $m_0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$  – вектор начальной маркировки позиций  $p_i \in P_f$  НСП, каждая компонента которого определяется значением функции принадлежности не-

четкого наличия одного маркера в соответствующей позиции данной НСП, при этом  $m_i^0 \in [0,1](\forall i \in \{1, 2, \dots, u\})$ ;

13)  $PR$  – конечное множество приоритетов, определяющих порядок срабатывания переходов в случае наличия нескольких активных переходов;

14)  $FP$  – функция, которая присваивает каждому переходу приоритет срабатывания  $FT: T \rightarrow PR$ ;

15)  $Z$  – вектор параметров временных задержек маркеров в позициях  $Z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ ;

16)  $D$  – вектор параметров времен срабатывания разрешенных переходов  $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)$ ;

17)  $Q$  – емкость позиций;

18)  $s$  – величина, соответствующая времени жизни метки в позиции,  $s \in N$ , где  $N$  – множество натуральных чисел;

19)  $n$  – целочисленная величина, равная минимальному числу меток, необходимому для активизации нейронного перехода;

20)  $g$  – функция для определения суммарного потенциала меток в каждой позиции в определенный момент времени.

В процессе функционирования модели для каждой нейронной позиции вычисляется функция суммарного потенциала  $g$  в зависимости от времени жизни меток:

$$g(q_i) = \sum_{i=0}^{i=S} \frac{s_i - i}{s_i} K(q_i - i) + \sum_{i=0}^{i=S} \frac{s_i - i}{s_i} J(q_i - i),$$

где  $K(q_i)$  – число меток с положительным потенциалом в позиции  $p_i$  в момент времени  $q_i$ ,  $J(q_i)$  – число меток с отрицательным потенциалом в позиции  $p_i$  в момент времени  $q_i$ .

Метки накапливаются в нейронных позициях и при наступлении требуемых условий срабатывания выходных переходов нейропозиции перемещаются из нее в другую позицию.

В определенных случаях требуется активизация лишь определенной ветки после срабатывания перехода, т. е. передачи меток только в определенные выходные позиции. Выборочная активизация выходных дуг особенно актуальна для моделирования условных веток алгоритмов. Для реализации возможности выборочной активизации выходных дуг можно использовать некоторое контрольное условие, которое вписывается в вариативное поле атрибутов перемещаемых меток<sup>1</sup>.

## 2. Построение моделей производственных процессов на основе МННСП

Применение аппарата МННСП для задач моделирования процессов сортировки, складирования и использования в технологических процессах остатков раскроя листового металла дает возможность наиболее оптимально реализовать данные имитационные модели в программной среде. Проверка работоспособности моделей, корректировка условий и параметров составляющих их элементов позволяют произве-

<sup>1</sup> Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Швецов А. Н. Нечеткие и нейронные сети Петри. – Курск: Университетская книга, 2019. – 209 с.

сти прогнозирование и скорректировать работу программных модулей и разрабатываемой СППР в целом<sup>1</sup>. Анализ сетей Петри помогает получить важную информацию о динамическом поведении моделируемых алгоритмов, являющуюся полезной для выработки управленческих предложений.

Алгоритм имитационного моделирования на МННСП был разработан и представлен в виде отдельной программы, которая запускается из обработки «СППР сортировки остатков раскроя» созданного программного комплекса<sup>2</sup>.

Общая модель процесса хранения и использования деловых остатков раскроя металла представлена на рис. 1.

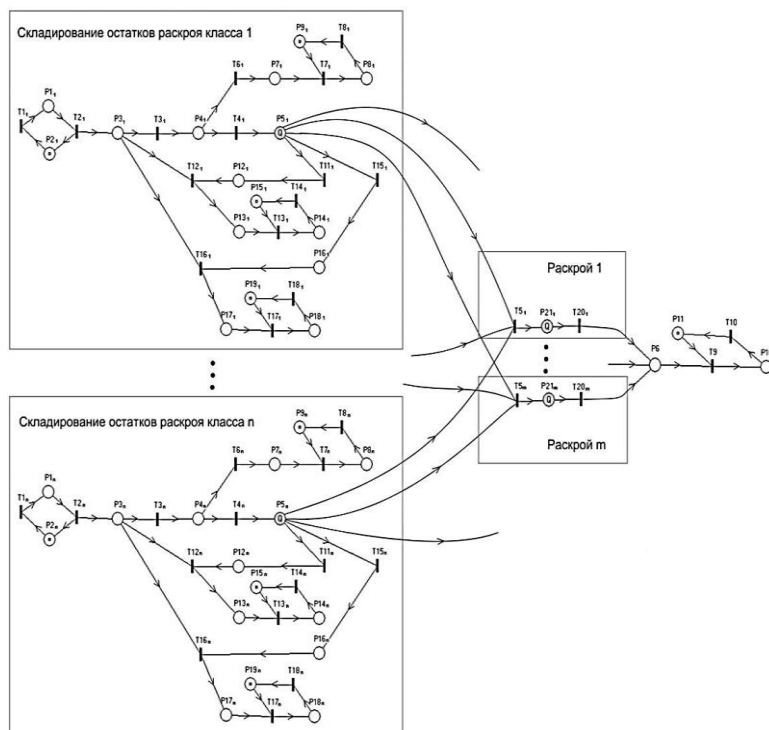


Рис. 1. Модель процесса хранения и использования деловых остатков

<sup>1</sup> Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Швецов А. Н. Нечеткие и нейронные сети Петри. – Курск: Университетская книга, 2019. – 209 с.; Швецов А. Н., Суконщиков А. А., Андриянов И. А., Кочкин Д. В. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений. – Курск: Университетская книга, 2018. – 251 с.

<sup>2</sup> Смирнов А. А., Шичков А. Н. Организация раскроя листового металла с учетом деловых материальных ресурсов на машиностроительном предприятии // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). – 2017. – № 4. – С. 22–35; Улитин А. В., Суконщиков А. А. Применение аппарата нейро-нечетких сетей Петри для моделирования СППР // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции (Курск, 19–20 марта 2015 г.). – Курск: Университетская книга, 2015. – С. 160–163; Швецов А. Н., Суконщиков А. А., Андриянов И. А., Кочкин Д. В. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений. – Курск: Университетская книга, 2018. – 251 с.

Анализ общей модели очень затруднителен ввиду ее структурной сложности и большого количества задаваемых параметров. Размеры модели в данном случае зависят от числа классов остатков и числа одновременных заданий на раскрой. Более простым способом моделирования является проведение исследований с отдельными структурными составляющими модели путем изменения переменных и параметров этих составляющих.

### 3. Построение модели алгоритма складирования деловых остатков

Издержки хранения остатков раскроя листового металла включают занимаемое пространство, оборудование, труд обслуживающего персонала и т. д. Для оценки целесообразности хранения остатков раскроя и определения оптимального хранимого количества деловых остатков возникает необходимость моделирования процесса складирования<sup>1</sup>. На рис. 2 показано графическое представление алгоритма управления складированием остатков раскроя листового металла определенного класса на базе разработанного аппарата МННСП. В соответствии с представленным алгоритмом вероятность сортировки остатков раскроя данного класса в группу неделовых остатков прямо пропорциональна увеличению среднего размера очереди от минимального до максимального порогового значения. Это означает, что чем больше остатков данного класса копится на складе, тем чаще остатки этого класса признаются неделовыми.

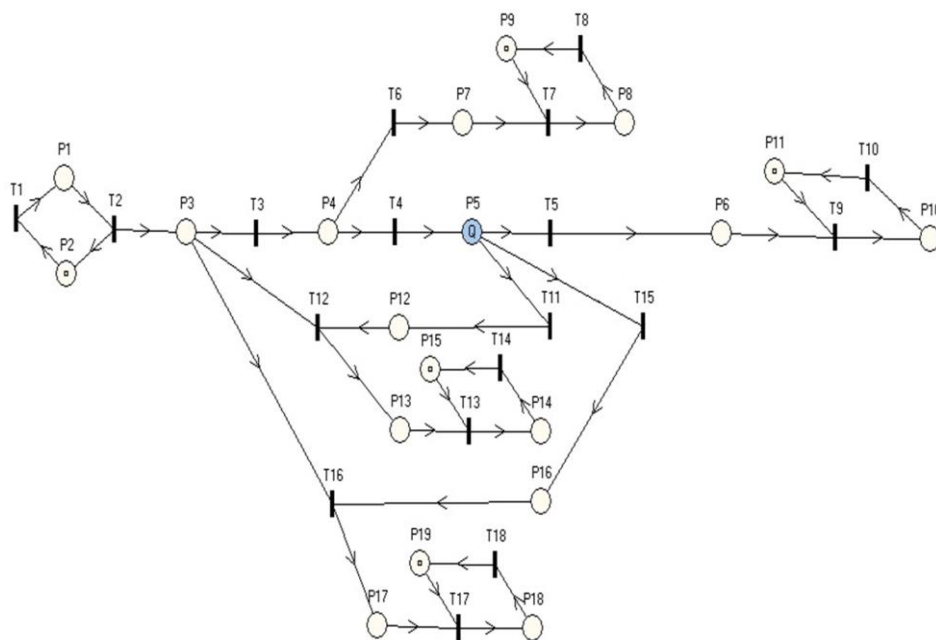


Рис. 2. Модель процесса складирования деловых остатков

Главная цель алгоритма заключается в минимизации среднего размера глубины склада, а значит, и общей задержки движения складских позиций. Под глубиной

<sup>1</sup> Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок. – Москва: Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

склада понимается количество каждой номенклатурной позиции, хранимой на складе. Предупреждая фактическое переполнение склада, данный механизм начинает относить остатки раскроя в группу недельных остатков с ненулевой вероятностью, когда средний размер очереди превысит определенное минимальное пороговое значение. Моделирование процесса складирования остатков раскроя позволяет скорректировать значение требуемого количества остатков данного класса ( $Q_{\text{ост}}$ , шт./мес.) и оптимизировать размеры мест хранения. По результатам моделирования  $Q_{\text{ост}}$  рационально принять равным среднему размеру очереди.

На рис. 2 представлены следующие позиции: P5 – позиция накопления маркеров очереди FIFO; P4 – определяющая позиция отбрасывания маркера в случае переполнения очереди; P3 – определяющая позиция отбрасывания маркера в случае долгого его нахождения в очереди. Под отбрасыванием маркера в данном случае понимается отнесение остатка раскроя в группу недельных остатков. Позиция P12 информирует определяющую позицию о наступлении первого порога интенсивности отбрасывания маркеров, P16 – о наступлении второго порога. Позиции P7, P13, P17 и P6 необходимы для анализа результатов моделирования. T4 – переход добавления маркера в очередь FIFO; T5 – переход выхода маркеров из очереди FIFO. Переход T11 реализует первый порог интенсивности отбрасывания маркеров, T15 реализует второй порог.

Данная модель включает три порога интенсивности отбрасывания маркеров. По мере достижения более высокого порога интенсивность отбрасывания маркеров растет. На переходах T11 и T15 происходит сравнение количества меток в очереди P5 с пороговыми значениями (T11 сравнивает с первым пороговым значением, а T15 – со вторым). Если соответствующее пороговое значение достигнуто, то эти переходы срабатывают и перемещают метки в позиции P12 и P16 (T11 перемещает в P12, а T15 – в P16). Интенсивность отбрасывания маркеров регулируется путем установления времен задержек восстановления и приоритетов на переходах T11, T12 и T15, T16. Третий порог отбрасывания маркеров, который отбрасывает абсолютно все не помещающиеся в очередь маркеры, реализован на переходе P6. Переход T6 имеет меньший приоритет, нежели T4, поэтому T6 отправляет метки в поглотитель только тогда, когда очередь P5 заполнена полностью.

При программном исследовании данной модели генератор P2-T1-P1-T2 порождает метки со значением нечеткого потенциала, равным 1, поэтому в начальный момент времени позиция P2 промаркирована. Позиция P5 реализует очередь FIFO емкостью 10 меток, емкости всех других позиций равны 1. Время задержки восстановления перехода T5 равно 6, это необходимо для моделирования накопления маркеров в очереди. На переходе T12 время восстановления равно 10, чтобы интенсивность отбрасывания меток при достижении первого порога была не слишком высокой. Параметры модели представлены на рис. 3.



Файл: Распределение Моделирование: Справка

Число позиций: 18 Число переходов: 10

Вектор начальных величностей позиций

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	1	1	1	10	1	1	1

Вектор временных задержек маркера в позиции

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
180	180	180	180	180	180	180	180

Вектор временных задержек восстановления переходов

T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
580	180	180	180	180	180	180	108

Вектор приоритетов переходов

T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1

Пороговое значение периода

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
1	1	1	1	1	1	1	1

Максимальное количество меток, необходимое для сбрасывания периода

Обнулить

Кардифиненты

K1	K2
P1	0.5
P2	0.5

Потенциал, необходимый для сбрасывания периода

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0	0	0	0	0	0	0

Позиции с РГО

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
0	0	0	0	1	0	0	0

Периоды, потенциалы которых сравнены на равенство

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
0	0	0	0	0	0	0	0

Значения меток в позиции

P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	1	1	1	1	1	1	1

Матрица неидентичности

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12												
P1	+1	-1																					
P2		+1	-1																				
P3				+1	-1																		
P4						+1	-1																
P5								+1	-1														
P6										+1	-1												
P7											+1												
P8												+1											
P9													+1										
P10														+1									
P11															+1								
P12																+1							
P13																	+1						
P14																		+1					
P15																			+1				
P16																				+1			
P17																					+1		
P18																						+1	
P19																							+1

Матрица идентичности

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
P1											
P2											
P3											
P4											
P5											
P6											
P7											
P8											
P9											
P10											
P11											
P12											
P13											
P14											
P15											
P16											
P17											
P18											
P19											

Рис. 3. Параметры модели складирования деловых остатков

На переходах T11 и T15 выставлены потенциалы, равные 5 и 8 соответственно, они соотносятся с первым и вторым порогами интенсивности отбрасывания маркеров. При появлении в очереди 5 маркеров начинает работать механизм отбрасывания, когда маркеров в очереди 8, механизм работает еще интенсивнее. Если очередь заполнится полностью (10 маркеров), то отбрасываются все маркеры – наступает третий порог.

Рассмотрим состояние системы после двухсот шагов моделирования. На рис. 4 изображена статистика по позициям. Из приведенной статистики видно, что всего за это время в системе появилась 101 метка (маркер). В определяющей позиции P3 побывало 100 меток, из них 70 меток попало в очередь P5, 16 – в поглотитель маркеров T13-P14-T14-P15 (показания снимаются с позиции P13, которая является входной для поглотителя маркеров), 13 – в поглотитель T17-P18-T18-P19 (показания снимаются с позиции P17), еще одна метка к концу моделирования осталась в позиции P3. Максимальное количество меток в очереди составило 8 маркеров (позиция P5). На третьем пороге не была удалена ни одна метка (показания снимаются с позиции P7). Из 70 меток из очереди извлеклись и попали в P6 63, еще 7 меток к концу моделирования остались в очереди P5.

Статистика по позициям																			
199	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
Ак.	0	0	0	0	6	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1
Пас.	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Макс.	1	1	1	1	8	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Всего	100	101	100	70	70	63	0	0	1	62	63	17	16	16	17	13	13	13	14
Загр.	0.500	0.500	0.500	0.350	0.980	0.390	0.000	0.000	1.000	0.310	0.690	0.900	0.080	0.080	0.920	0.130	0.065	0.065	0.930

Рис. 4. Статистика по позициям

Средний размер очереди P5 составил 6 меток (между первым и вторым порогом интенсивности отбрасывания маркеров). Статистика по позициям подтверждается статистикой по переходам (см. рис. 5).

Статистика по переходам																		
199	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16	T17	T18
Срабат.	100	100	70	70	33	0	0	0	62	62	17	16	16	16	13	13	13	13
Запрет.	0	0	0	0	7	0	0	0	0	0	18	0	0	0	14	0	0	0
Сон	100	100	70	70	198	0	0	0	62	62	17	160	16	16	13	13	13	13

Рис. 5. Статистика по переходам

## Выводы

Полученные результаты показывают, что модифицированные нейро-нечеткие сети Петри являются эффективным средством построения нечетких моделей технических и организационных систем. Применение аппарата МННСП позволяет адекватно моделировать процессы хранения и использования деловых остатков металла на складах предприятия, что дает возможность установить оптимальные размеры складских помещений и спрогнозировать наиболее целесообразные варианты использования деловых остатков на определенные периоды работы.

## Литература

Бодянский Е. В., Кучеренко Е. И., Михалев А. И. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 311 с.

Демидова Л. А., Кираковский В. В., Пылькин А. Н. Принятие решений в условиях неопределенности. – Москва: Горячая линия-Телеком, 2016. – 289 с.

Дыбская В. В. Управление складированием в цепях поставок. – Москва: Альфа-Пресс, 2009. – 720 с.

Крюкова Д. Ю., Суконщиков А. А. Системы поддержки принятия решений на базе аппарата сетей Петри // Информационные технологии в проектировании и производстве. – 2008. – № 3. – С. 45–49.

Смирнов А. А., Шичков А. Н. Организация раскроя листового металла с учетом деловых материальных ресурсов на машиностроительном предприятии // Вестник Южно-Российского государственного технического университета (НПИ). – 2017. – № 4. – С. 22–35.

Суконщиков А. А. Концепция системы ситуационного интеллектуально-агентного моделирования // Интеллектуально-информационные технологии и интеллектуальный бизнес (ИНФОС-2017): материалы IX Международной научно-технической конференции, посвященной 175-летию со дня рождения Х. С. Леденцова (Вологда, 30 июня – 01 июля 2017 г.). – Вологда: ВоГУ, 2017. – С. 160–164.

Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Швецов А. Н. Нечеткие и нейронные сети Петри. – Курск: Университетская книга, 2019. – 209 с.

Улитин А. В., Суконщиков А. А. Применение аппарата нейро-нечетких сетей Петри для моделирования СППР // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции (Курск, 19–20 марта 2015 г.). – Курск: Университетская книга, 2015. – С. 160–163.

Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Исследование процессов в многоуровневых системах поддержки принятия решений. – Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2019. – 151 с.

Швецов А. Н., Суконщиков А. А., Андрианов И. А., Кочкин Д. В. и др. Распределенные интеллектуальные информационные системы и среды. – Курск: Университетская книга, 2017. – 197 с.

Швецов А. Н., Суконщиков А. А., Андрианов И. А., Кочкин Д. В. Ситуационные интеллектуальные системы поддержки принятия решений. – Курск: Университетская книга, 2018. – 251 с.

## References

- Bodianskii E. V., Kucherenko E. I., Mikhalev A. I. *Neiro-fazzi seti Petri v zadachakh modelirovaniia slozhnykh sistem* [Neuro-fuzzy Petri nets in the tasks of modeling complex systems]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2005. 311 p.
- Demidova L. A., Kirakovskii V. V., Pyl'kin A. N. *Priniatie reshenii v usloviakh neopredelennosti* [Decision making under conditions of uncertainty]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2016. 289 p.
- Dybskaia V. V. *Upravlenie skladirovaniem v tsepiakh postavok* [Managing warehousing in the supply chain]. Moscow: Al'fa-Press, 2009. 720 p.
- Kriukova D. Iu., Sukonshchikov A. A. Sistemy podderzhki priniatiia reshenii na baze apparata setei Petri [Decision support systems based on the apparatus of Petri nets]. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovanii i proizvodstve* [Information Technologies in OF CAD/CAM/CAE (ITDP)], 2008, no. 3, pp. 45–49.
- Smirnov A. A., Shichkov A. N. Organizatsiia raskroia listovogo metalla s uchetom delovykh material'nykh resursov na mashinostroitel'nom predpriatii [Organization of sheet metal cutting taking into account business material resources at an engineering enterprise]. *Vestnik Iuzhno-Rossiiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (NPI)* [Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI)], 2017, no. 4, pp. 22–35.
- Sukonshchikov A. A. Kontseptsiiia sistemy situatsionnogo intellektual'no-agentnogo modelirovaniia [The concept of a system of situational intellectual-agent modeling]. *Intellektual'no-informatsionnye tekhnologii i intellektual'nyi biznes (INFOS-2017): materialy IX Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, posviashchennoi 175-letiiu so dnia rozhdeniia Kh. S. Ledentsova (Vologda, 30 iunია – 01 iulია 2017 g.)* [Intellectual-information technologies and intelligent business (INFOS-2017). Proceedings of IX international scientific and technical conference in honor of 175<sup>th</sup> anniversary of Kh. S. Ledentsov birth (Vologda, 30 June – 01 July 2017)]. Vologda: VoGU, 2017, pp. 160–164.
- Sukonshchikov A. A., Kochkin D. V., Shvetsov A. N. *Nechetkie i neiromnye seti Petri* [Fuzzy and neural Petri nets]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2019. 209 p.
- Ulitin A. V., Sukonshchikov A. A. Primenenie apparata neiro-nechetkikh setei Petri dlia modelirovaniia SPPR [Application of the neuro-fuzzy Petri nets apparatus for modeling DSS]. *Sovremennye instrumental'nye sistemy, informatsionnye tekhnologii i innovatsii: sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Kursk, 19–20 marta 2015 g.)* [Modern instrumental systems, information technologies and innovations: Proceedings of the 12th International scientific and practice conference (Kursk, 19–20 March 2015)]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2015, pp. 160–163.
- Tsekhanovskii V. V., Chertovskoi V. D. *Issledovanie protsessov v mnogourovnevnykh sistemakh podderzhki priniatiia reshenii* [The study of processes in multi-level decision support systems]. St Petersburg: LETI, 2019. 151 p.
- Shvetsov A. N., Sukonshchikov A. A., Andrianov I. A., Kochkin D. V. i dr. *Raspredeennye intellektual'nye informatsionnye sistemy i sredy* [Distributed intelligent information systems and environments]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2017. 197 p.
- Shvetsov A. N., Sukonshchikov A. A., Andrianov I. A., Kochkin D. V. *Situatsionnye intellektual'nye sistemy podderzhki priniatiia reshenii* [Situational intelligent decision support systems]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2018. 251 p.

**Для цитирования:** Суконщиков А. А., Швецов А. Н., Улитин А. В. Разработка и применение нейро-нечетких сетей Петри // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 2 (95). – С. 35–46. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-2-95-3

**For citation:** Sukonshchikov A. A., Shvetsov A. N., Ulitin A. V. Development and application of neuro-fuzzy Petri nets. *Bulletin of the Cherepovets State University*, 2020, no. 2 (95), pp. 35–46. DOI: 10.23859/1994-0637-2020-2-95-3