

# ТЕМПОРАЛЬНЫЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКИЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Прокопенко С.А.*

*Белорусско-Российский университет*

*e-mail: puss95@yandex.by*

*Бобряков А.В., д.т.н., профессор*

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»*

*e-mail: avbob@mail.ru*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы в современных производственных информационно-технологических системах все в большей степени приобретают комбинированный характер информационно-аналитических и производственно-технологических процессов, представляющих собой конвергенцию решаемых производственно-технологических и информационно-аналитических задач.

При этом производственно-технологические задачи определяют следующие особенности информационно-технологических процессов:

- могут быть реализованы различными совокупностями технологических операций;
- динамичное изменение структуры и параметров процесса;
- функциональные подсистемы и их элементы взаимозависимы, кроме того, элементы одной подсистемы могут являться одновременно и элементами другой подсистемы [1];
- процессы отличаются сложностью, которая возрастает по мере повышения требований к эффективности функционирования;
- являются энерго- и ресурсоемкими;
- могут относиться к категории вредных и опасных (с точки зрения техногенных нарушений и аварийных ситуаций);
- ограниченные возможности проведения экспериментальных исследований;
- отсутствие точной информации о состоянии оборудования;
- большинство процессов характеризуются непрерывным циклом.

В свою очередь, информационно-аналитические задачи характеризуются:

- неполнотой информации о функционировании и состоянии процессов;
- наличием сложных нелинейных зависимостей между параметрами;
- необходимостью обработки и анализа больших объемов разнородной информации;
- высокой динамикой изменения системных и внешних факторов, влияющих на эффективность управления [2, 3].

Сети Петри хорошо зарекомендовали себя как удобный, наглядный аппарат для моделирования и анализа сложных процессов. Однако их использование для моделирования информационно-технологических процессов без использования расширений затруднительно. Это связано с особенностями функционирования таких процессов.

Зачастую на практике применяют разновидности сетей Петри, которые позволяют учитывать особенности конкретных процессов. Так, нечеткие сети Петри позволяют учитывать нестохастическую неопределенность, нейро-нечеткие сети Петри – учитывать накопленный опыт ([4]), а временные сети Петри – моделируемых временные аспекты этих процессов.

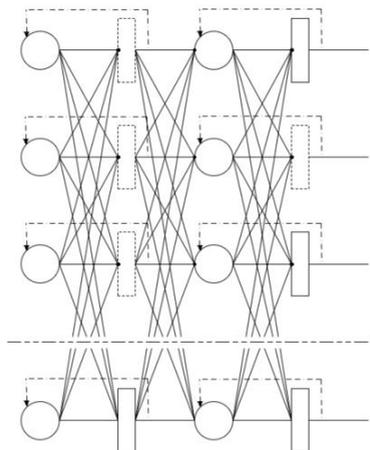
## 2. ТЕМПОРАЛЬНЫЕ НЕЙРО-НЕЧЕТКИЕ СЕТИ ПЕТРИ

Предлагаемая темпоральная нейро-нечеткая сеть Петри (ТННСП) может быть представлена следующим образом:

$$TNFPN = (P, T, I, O, F, Al, D, m_0, \alpha, R),$$

где  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_{np}\}$  – конечное непустое множество вершин сети Петри,  $np$  – общее количество вершин;  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_{nt}\}$  – конечное непустое множество переходов сети Петри,  $nt$  – общее количество переходов;  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_{ni}\}$  – входные функции переходов;  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_{no}\}$  – выходные функции переходов;  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_{nf}\}$  – конечное непустое множество максимального времени выполнения переходов сети Петри;  $Al = \{Al_1, Al_2, \dots, Al_{na}\}$  – множество темпоральных правил логики Алена для переходов сети,  $na$  – общее число правил;  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_{nd}\}$  – конечное множество значений меток, необходимое для срабатывания перехода при переходе по дуге,  $nd$  – общее количество дуг;  $m_0$  – вектор начальной маркировки, каждый компонент которого определяется значением функции принадлежности нечеткого наличия маркера в соответствующей позиции;  $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{nr}\}$  – вектор значений срабатывания перехода,  $R = \{R_1, R_2, \dots, R_{nr}\}$  – конечное множество ресурсов.

На рис. 1 представлена обобщенная структура ТННСП.



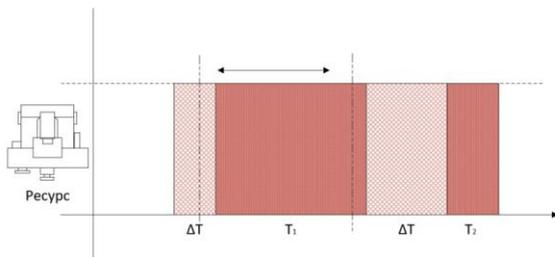
**Рис. 1. Обобщенная структура темпоральной нейро-нечеткой сети Петри**

Применение нейро-нечетких переходов в сетях Петри, реализуемых с использованием нечетких нейронов [5] позволяет учитывать неопределенность и ранее полученные результаты структурно-параметрической настройки.

Моделирование информационно-технологических процессов может характеризоваться различными траекториями, построение которых затруднено для классических или нейро-нечетких сетей Петри, а выбор актуальной траектории является полнопереборной задачей [6].

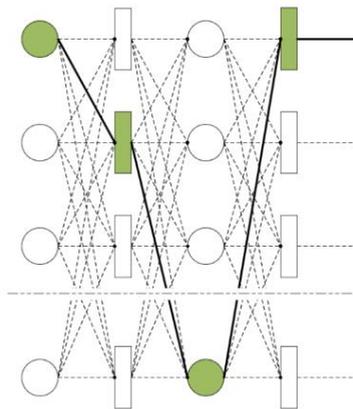
Использование же для предлагаемой модели темпоральной логики Аллена позволяет описывать последовательности моделируемых событий их взаимосвязи по временной шкале и учитывать временные причинно-следственные связи [7, 8]. Особенностью темпоральной логики Аллена является использование временных интервалов. Это также позволяет резервировать и адаптивно распределять ресурсы на временных интервалах в рамках моделируемого информационно-технологического процесса.

На рис. 2 показан пример диаграммы использования ресурса, с возможностью его гибкого перераспределения с использованием ТННСП без изменения других параметров информационно-технологического процесса.



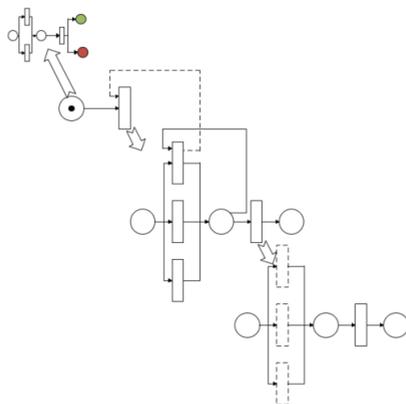
**Рис. 2. Пример перераспределения ресурса с использованием ТНСП**

В итоге удастся существенно снизить количество возможных траекторий реализации информационно-технологического процесса [9]. На рис. 3 показан пример структуры ТНСП, моделирующая выбранную траекторию информационно-технологического процесса с учетом ограничений, накладываемых временными причинно-следственными связями.



**Рис. 3. Пример структуры ТНСП, моделирующая траекторию информационно-технологического процесса**

На рис. 4 представлен фрагмент ТНСП, иллюстрирующий совместное использование нейро-нечетких элементов и временных причинно-следственных связей (реализуемых с использованием правил темпоральной логики Аллена) между последовательностями событий при моделировании информационно-технологического процесса в условиях неопределенности.

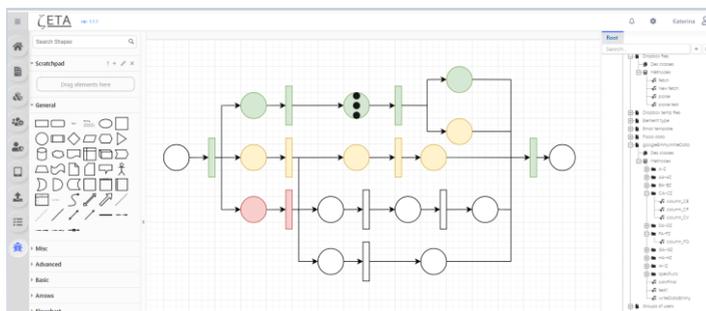


**Рис. 4. Фрагмент ТНСП, иллюстрирующий совместное использование нейро-нечетких элементов и правил темпоральной логики Аллена**

### 3. ПРОГРАММНОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ

Разработано программное приложение для моделирования информационно-технологических процессов на основе ТНСП, обладающая следующими возможностями (рис. 5):

- формирование онтологической модели сложной системы, включающей классы информационных сущностей и квазиерархические связи между ними;



**Рис. 5. Экранная форма разработанного приложения**

- ввод и хранение пользовательских и получаемых из внешних источников данных;
- использование нейросетевого супервизора для валидации внешних и аналитических данных;

- построение информационно-технологического процесса с использованием конструкторов на основе ТННСП;
- гибкая настройка управления приоритетами конкурирующих за ресурсы информационно-технологических процессов на основе ТННСП.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены темпоральные нейро-нечеткие сети Петри, ориентированные на моделирование информационно-технологических процессов, представляющих собой конвергенцию решаемых производственно-технологических и информационно-аналитических задач.

Использование предлагаемых моделей позволяет моделировать информационно-технологические процессы с учетом временных причинно-следственных взаимосвязей между последовательности событий в условиях неопределенности, и обеспечивает существенное снижение числа возможных траекторий реализации этих процессов.

#### Литература

1. Bobryakov A.V., Borisov V.V., Misnik A.E., Prokopenko S.A. Approaches to the Implementation of Information-Analytical Processes in Complex Technical-Organizational Systems // V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – 2020. – DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111833.
2. Kutuzov V.V., Misnik A.E., Prakapenka S.A. Development of Information-Analytical Processes in Cyber-Physical Systems Based on Neural-Fuzzy Petri Nets // International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2020. 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271400.
3. Borisov V.V., Misnik A.E., Krutalevich S.K., Prokopenko S.A. Automation Methodology for Complex Technical-Organizational Systems // V International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – 2020. – DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111813.
4. Борисов В.В., Захарченков К.В., Кутузов В.В., Мисник А.Е., Прокопенко С.А. Моделирование образовательных процессов на основе нейро-нечетких темпоральных сетей Петри // Прикладная информатика. – 2021. – № 4. – С. 35-47.
5. Kwan H., Cai L. A fuzzy neural network and its application to pattern recognition // IEEE Transactions on Fuzzy System. – 1994. – Vol. 2, No. 3. – P. 185-193.
6. Andrade E., Maciel P., Callou G., Araujo C. An Approach Based in Petri Net for Requirement Analysis. – 2010. – DOI: 10.5772/7495.
7. Griffin J., Lcsani M., Shadab N., Yin X. TLC: temporal logic of distributed components // Proceedings of the ACM on Programming Languages. – 2020. – Vol. 4, (ICFP), article 23. – DOI: 10.1145/3409005.
8. Balbiani P., Boudou J., Diczguz M., Fernandez-Duque D. Intuitionistic linear temporal logics // ACM Transactions on Computational Logic. – 2019. – Vol. 21, No. 2. – P. 1-32. – DOI: 10.1145/3365833.
9. Wu J., Yan S. Reliability Evaluation for Mechanical Systems by Petri Nets // Petri Nets in Science and Engineering. – 2018. – DOI: 10.5772/intechopen.79624.