

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАСШИРЕНИЙ СЕТЕЙ ПЕТРИ

**П.В. Скородумов**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных и программно-информационных систем Института социально-экономического развития территорий РАН, доцент кафедры «Автоматики и вычислительной техники» Вологодский государственный университет (Вологда), Россия

**Аннотация.** Сети Петри являются одним из формализмов исследования сложных систем. Благодаря таким преимуществам как наглядность, ясность и четкость представления, разнообразные возможности анализа они получили широкое распространение в имитационном моделировании. В статье приведены наиболее перспективные расширения аппарата сетей Петри с точки зрения исследования сложных систем. Рассмотрены их особенности и преимущества. В заключение статьи выдвигается предложение об использовании рассмотренных модификаций для развития аппарата вложенных гибридных сетей Петри.

**Ключевые слова:** Сложные системы, раскрашенные, вложенные, гибридные, нечеткие и нейронные сети Петри.

Сети Петри (СП) являются одним из распространенных графических средств исследования систем. Популярность их вызвана удачным представлением различных типов объектов, присутствующих во многих моделируемых системах, и событийным подходом к моделированию. СП обладают наилучшими возможностями для описания взаимосвязей и взаимодействий параллельно работающих процессов [5].

СП являются мощным инструментом исследования систем благодаря возможности описания дискретных, асинхронных, параллельных, распределенных, недетерминированных систем, наглядности представления их работы, развитому математическому и программному аппарату анализа. СП разрабатывались специально для моделирования тех систем, которые содержат параллельно взаимодействующие компоненты [5].

Существуют различные модификации аппарата СП. Рассмотрим наиболее перспективные расширения, которые можно использовать для моделирования сложных систем (СС). Под сложностью системы обычно понимается – сложность поведения, сложность структуры, переменный, зависящий от времени состав моделируемых объектов [8].

С точки зрения возможностей описания структурной сложности систем можно выделить раскрашенные и вложенные СП.

В раскрашенных сетях фишкам приписываются различные цвета. Позиции также имеют цвет, при этом позиция может содержать фишки только приписанного ей цвета [2, 6]. Такие СП используются при моделировании систем с разделением ресурсов.

Раскрашенной СП называется набор:

$$CPN = (\Omega, N, C, W, G, M_0), \quad (1)$$

где  $\Omega$  – конечное непустое множество цветов;

$N = (P, T, F)$  – конечная сеть с множеством позиций  $P$ , множеством переходов  $T$  и отношением инцидентности  $F$ ;

$C$  – функция раскраски позиций;

$W$  – функция раскраски дуг сети;

$G$  – функция охраны переходов;

$M_0$  – начальная разметка сети.

Во вложенных СП фишки, рассматриваются как объекты, имеющие самостоятельное поведение, которое описывается также некоторыми СП [7].

Двухуровневой вложенной СП (NP-сетью) называется набор [4]:

$$NPN = (Atom, Lab, SN, (EN_1, \dots, EN_k), \Lambda) \quad (2)$$

$Atom = Var \cup Con$  – множество имен переменных (позиций) и констант (фишек);  $Lab = Lab_v \cup Lab_h$  – множество меток горизонтальной и вертикальной синхронизации;  $SN$  – системная сеть, представленная в виде СП высокого уровня;  $(EN_1, \dots, EN_k)$  ( $k \geq 1$ ) – конечный набор обыкновенных сетей Петри (элементные сети);  $\Lambda$  – функция пометки переходов (помечает переходы  $SN$  сети метками из  $Lab_v$ , а переходы в  $EN$  сетях метками из  $Lab$ ).

Вложенная СП состоит из набора  $EN$  сетей, задающих структуру сетевых фишек и  $SN$  сети. Последняя представляет собой предикатную СП. Некоторые переходы в  $SN$  сети и  $EN$  сетях помечены специальными метками для обеспечения механизма синхронизации этих переходов.

В поведении  $NPN$  определяются четыре вида шагов срабатывания.

Шаг переноса – это срабатывание перехода  $SN$  сети в соответствии с правилами для СП высокого уровня,

при этом EN сети рассматриваются как фишки, не имеющие собственной структуры.

Элементно-автономный шаг меняет только внутреннее состояние EN сети, не меняя ее местонахождения в SN сети.

Шаг горизонтальной синхронизации – одновременное срабатывание переходов в EN сетях (помеченных метками горизонтальной синхронизации), находящихся в одной позиции SN сети.

Шаг вертикальной синхронизации – одновременное срабатывание перехода SN сети и переходов EN сетей (помеченных метками вертикальной синхронизации), задействованных в этом срабатывании.

Вложенные СП обладают рядом преимуществ, которые делают их удобным инструментом для моделирования и анализа СС: иерархическая и модульная структура, присутствие элементарных сетей с собственным строением и поведением, наличие механизмов горизонтальной и вертикальной синхронизации, распараллеливание общей задачи [7].

С точки зрения возможностей описания сложного поведения можно отметить такие расширения как гибридные, нечеткие и нейронные СП.

В поведении ГСП моделей различают две составляющие непрерывную и дискретную. Первая представляет собой зависящее от времени поведение и описывается моделями, в которых непрерывные сигналы имеют постоянные значения, сигнал в каждой такой позиции меняется линейно во времени. ГСП представляет собой набор [7]:

$$N = (P, T, Pre, Post, D, C), \quad (3)$$

где  $P = P_d \cup P_c$  – множество позиций (дискретных  $P_d$  и непрерывных  $P_c$ );

$T = T_d \cup T_c$  – множество переходов (дискретных  $T_d$  и непрерывных  $T_c$ );

$Pre, Post$  – матрицы инцидентности ГСП;

$D$  – функция, определяющая временные интервалы срабатывания для каждого дискретного временного перехода;

$C$  – функция, определяющая скорость срабатывания непрерывных переходов.

Дискретный сигнал в ГСП представляет собой управляющий сигнал. Под его воздействием осуществляется координация работы системы, реализуются управляющие алгоритмы.

Нечеткое моделирование предоставляет эффективные методы и средства для их изучения в следующих основных сферах применения:

1. Недостаточность и неопределенность знаний об исследуемой системе, когда получение требуемой информации является сложной, трудоемкой, дорогостоящей или вовсе невозможной задачей.

2. Адекватная обработка неопределенной информации, если параметры и входные данные не являются точными и корректно представленными.

3. Моделирование и идентификация реальных систем, которые являются нелинейными в своей основе и не могут быть представлены моделями, использующими существующие методы идентификации.

Нечеткие модели представляют необходимый инструмент для исследования как отдельных аспектов, так и всей системы в целом на различных этапах ее анализа в случае доминирования качественных элементов над количественными [1].

Вводя нечеткость в описание отдельных компонентов временных СП, различают временные СП с нечеткостью в задании структуры, начальной маркировки, времен задержки маркеров в позициях и времен срабатывания активных переходов, задания начальной маркировки, времен задержки маркеров в позициях и времен срабатывания активных переходов, задания правил, определяющих процесс функционирования сети.

Нейронные СП оптимальны для построения моделей, характеризующихся большим количеством взаимодействующих процессов и их значительной размерностью. Использование аппарата искусственных нейронных сетей (ИНС) в составе моделей СП дает возможность ввести в СП нейронные позиции, которые позволяют применять алгоритмы обучения и по существу являются пороговыми элементами памяти для формирования меток в соответствующих позициях.

Математический аппарат нейроподобных СП (НСП), представляет собой конвергенцию нейронных сетей, маркированных цветных СП с ингибиторными элементами с методами обучения ИНС [10]. НСП обладают очень важными свойствами, такими как накопление информации и способность к обучению по выбранному алгоритму на обучающих примерах или предыстории какого-либо процесса. Особенностью применения такого гибридного аппарата к построению моделей является возможность представления дискретных процессов детерминированной СП, а непрерывных процессов – ИНС.

Нейроподобная сеть Петри может определяться набором [3]:

$$NP = (P, T, A, S, F, q, n, n1, g, h, C), \quad (4)$$

где  $P$  – конечное непустое множество позиций;

$T$  – конечное непустое множество переходов;

$A$  – множество дуг;

$S(F)$  – конечное непустое множество начальных (конечных) позиций;

$q$  – величина, соответствующая времени жизни ("потенциалу") метки в позиции;

$n(n1)$  – целочисленная величина, равная минимальному числу меток, необходимому для активизации обычного (нейронного) перехода;

$g$  – функция определения суммарного потенциала меток в каждой позиции в определенный момент времени;  
 $C = \{a, b\}$  – множество цветов меток ( $a$  – метки с положительным потенциалом,  $b$  – метки с отрицательным потенциалом);  
 $h$  – функция раскраски выходных и входных дуг переходов.

Рассмотренные выше модификации СП позволяют описывать СС с различных точек зрения, однако универсального средства на сегодняшний день не существует и каждое расширение направлено на решение какой-то одной группы проблем, возникающих при моделировании СС.

Попытки объединить положительные стороны разных модификаций предпринимались, например, в [7, 9, 10]. В первом случае был представлен аппарат вложенных гибридных СП, позволяющий моделировать СС, в которых параллельно функционируют дискретные и непрерывные компоненты. Во втором случае аппарат объединял нечеткие и нейронные СП, что позволило моделировать процесс «обучения» системы с компонентами, поведение которых носит случайный характер.

Следует отметить возможность дальнейшего расширения аппарата вложенных гибридных СП за счет введения в управляющую (дискретную) часть нечетких и нейронных СП, что позволит моделировать «обучаемые» СС с нечеткой структурой.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов, В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – М. : Горячая линия – телеком, 2007. – 284с.
2. Котов, В. Е. Сети Петри / В. Е. Котов. – М. : Наука, 1984. – 160 с.
3. Кочкин, Д. В., Суконщиков, А. А. Моделирование сетевых устройств на базе нейронечетких сетей / Д. В. Кочкин, А. А. Суконщиков // Теоретические основы и методология имитационного и комплексного моделирования. – 2009. [Электронный ресурс]. URL : <http://simulation.su/uploads/files/default/immod-2009-1-152-154.pdf>.
4. Ломазова, И. А. Вложенные сети Петри и моделирование распределенных систем / И. А. Ломазова // Программные системы : теория и приложения. – 2004.
5. Мальков, М. В., Малыгина, С. Н. Сети Петри и моделирование / М. В. Мальков, С. Н. Малыгина // Труды Кольского научного центра. 2010. [Электронный ресурс]. URL : <http://cyberleninka.ru/article/n/seti-petri-i-modelirovanie>.
6. Питерсон, Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – М. : Мир, 1984. – 264 с.
7. Скородумов, П. В. Моделирование сложных динамических систем на базе вложенных гибридных сетей Петри / П. В. Скородумов // Системы управления и информационные технологии : научно-технический журнал. 2008. – С. 182–187.
8. Скородумов, П. В., Суконщиков, А. А. Моделирование сложных динамических систем на базе расширений сетей Петри / П. В. Скородумов, А. А. Суконщиков // Имитационное моделирование теория и практика : Третья всероссийская научно-практическая конференция. – 2007. – С. 230–233.
9. Скородумов, П. В. Модифицированный аппарат вложенных гибридных сетей Петри / П. В. Скородумов // ИН-ФОС. – 2011.
10. Суконщиков, А. А., Крюкова, Д. Ю. Нейроподобные сети Петри при моделировании социальных процессов / А. А. Суконщиков, Д. Ю. Крюкова // Программные продукты и системы. – 2011. – № 2 (94). – С. 25–30.

Материал поступил в редакцию 30.09.14.

## ANALYSIS OF FUTURE EXPANSIONS OF PETRI NETWORKS

**P.V. Skorodumov**, Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory of Intelligent, Software and Information systems, Institute for Socio-Economic Development of RAS, Associate Professor of "Automation and Computer Engineering" Department Vologda State University (Vologda), Russia

**Abstract.** Petri nets are one of the formalisms for research of complex systems. Due to such advantages as the visibility and clarity of the presentation and a variety of analysis capabilities, they are widely used in simulation modeling. The article presents the most promising extensions of Petri nets in terms of complex systems research. The author considers their features and advantages. The conclusion of the article put forward a proposal on the use of considered modifications for the development of embedded machines of hybrid Petri nets.

**Keywords:** complex systems, painted, embedded, hybrid, fuzzy and neural Petri nets.