

# АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ PROLOG-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ПРЕДИКАТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ПРАВИЛ НЕЧЕТКОЙ ПРОДУКЦИИ

Д. А. Антонов, А. А. Суконщиков, канд. техн. наук

Вологодский государственный технический университет, г. Вологда, Россия

*Одним из наиболее популярных сейчас методов описания систем с параллельно функционирующими и асинхронно взаимодействующими компонентами стал подход, который основан на использовании сетевых моделей, восходящих к сетям специального вида, предложенным Карлом Петри. В статье рассмотрен метод внесения неопределенности в предикатные сети Петри высокого уровня, интерпретируемые на языке Prolog, позволяющий строить и исследовать нечеткие модели на их основе, без изменения программ верификации.*

*Ключевые слова:* верификация, сети Петри, предикатные сети Петри, сети типа "предикат/переход", нечеткая логика, системы на базе правил нечеткого вывода, нечеткое моделирование.

Примерами дискретных систем могут служить ЭВМ, их элементы и устройства, сети ЭВМ, программы и операционные системы, социально-экономические структуры и т. п.

В работах [1, 2] показаны методы, позволяющие построить и применять автоматизированную систему формальной верификации моделей, построенных на основе интерпрети-

руемых на языке Prolog предикатных сетей Петри. В работе [2] в качестве базового формализма для представления моделей избраны сети Петри типа "предикат/переход" (Predicate/Transition net или — PrT-net), расширенные возможностью использования кловов языка Prolog. Применение предикатных сетей позволяет добиться компактности представления больших и сложных систем без потери формальных основ сетей Петри. Количественно и качественно переход от сетей Петри к предикатным сетям сравним с переходом от логики высказываний к логике исчисления предикатов первого порядка. Предикатные сети, расширенные кловами Prolog как сети высокого уровня, представляют гораздо больше возможностей для моделирования сложных систем, таких как типизация и сложная структура меток (метки могут нести данные), охранные функции переходов, которые позволяют не только анализировать типы меток, но и оперировать с ними.

Все вышеперечисленное позволяет Prolog-ориентированным предикатным сетям с успехом применяться (с минимальными модификациями или даже без них) как основе для анализа и формальной верификации моделей, выраженных и на других классах сетей Петри. Ниже рассмотрим возможность внесения элементов нечеткости в Prolog-ориентированные предикатные сети Петри.

При управлении сложными техническими системами, как правило, приходится сталкиваться с различной степенью неопределенности исходных данных, параметров системы, нечеткостью целей и задач управления. Причины возникновения неопределенности могут заключаться в стохастической природе влияющих на систему внешних факторов, в особенностях протекающего технологического процесса и в непредсказуемости управляющего воздействия человека.

Впервые понятие нечеткого алгоритма было введено в работе [3]. Методы нечеткого управления нашли широкое применение в промышленности и благодаря успешному их применению эта область науки стала активно развиваться.

При традиционном нечетком управлении осуществляется параллельная обработка большого числа так называемых нечетких продукционных правил. Любая задача нечеткого управления может быть решена методом прямого вывода заключений, но следует отметить, что решение практических задач нечеткого вывода в системах нечетких продукций характеризуется высокой трудоемкостью выполнения численных расчетов. Поэтому в таких случаях не вызывает сомнения необходимость использования для этой цели специальных программных инструментов и программных средств, позволяющих существенно упростить создание и анализ соответствующих нечетких моделей. Одним из главных достоинств представления базы нечетких продукционных правил в виде нечеткой

сети Петри (НСП) и последующего решения задачи вывода заключений на ее основе является наглядность и визуализация всех промежуточных результатов. При решении прикладных задач нечеткого моделирования и выполнения процесса приближенных рассуждений часто используются НСП типа  $C_f'$  [4].

Для анализа возможности применения Prolog-ориентированных предикатных сетей Петри и для представления правил нечеткой продукции воспользуемся традиционными подходами к интерпретации позиций и переходов НСП [4] и выразим типовые элементарные правила нечеткой продукции через структуры Prolog-ориентированных предикатных сетей Петри.

- Правило нечеткой продукции вида "ПРАВИЛО  $i$ : ЕСЛИ  $A$  ТО  $B$ " представляется как некоторый переход сети Петри, при этом условию  $A$  этого правила соответствует входная позиция этого перехода, а заключению — выходная позиция этого перехода (рис. 1,  $a$ ).

- Если условие правила нечеткой продукции состоит из нескольких подусловий, соединенных операцией нечеткой конъюнкции  $A = A_1 \wedge A_2 \wedge \dots \wedge A_l$ , то все эти подусловия представляются как входные позиции соответствующего перехода (см. рис. 1,  $b$  для случая  $l = 3$ ).

- Если заключение правила нечеткой продукции состоит из нескольких подзаключений соединенных операцией конъюнкции  $B = B_1 \wedge B_2 \wedge \dots \wedge B_r$ , то все эти подзаключения также представляются как выходные позиции соответствующего перехода (см. рис. 1,  $b$  для случая  $l = 3$ ).

- Если условие правила нечеткой продукции состоит из нескольких подусловий, соединенных операцией нечеткой дизъюнкции  $A = A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_l$ , то все эти подусловия представляются как входные позиции отдельных переходов  $t_i$  для  $i \in \{1, 2, \dots, l\}$  (см. рис. 1,  $c$  для случая  $l = 3$ ).

- Если же заключение правила нечеткой продукции состоит из нескольких подзаключений, соединенных операцией нечеткой дизъюнкции  $B = B_1 \vee B_2 \vee \dots \vee B_r$ , то все эти подзаключения представляются как выходные позиции отдельных переходов  $t_i$  для  $i \in \{1, 2, \dots, l\}$  (см. рис. 1,  $d$  для случая  $l = 3$ ).

При этом коэффициенты определенности  $F_i$  правил нечетких продукций преобразуются в вектор  $F = (f_1, f_2, \dots, f_u)$  значений функций принадлежности нечеткого срабатывания переходов, а степеням истинности подусловий правил соответствуют значения компонентов начальной маркировки  $m_0 = (m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$ , которая в этом случае описывает текущую ситуацию моделируемой предметной области.

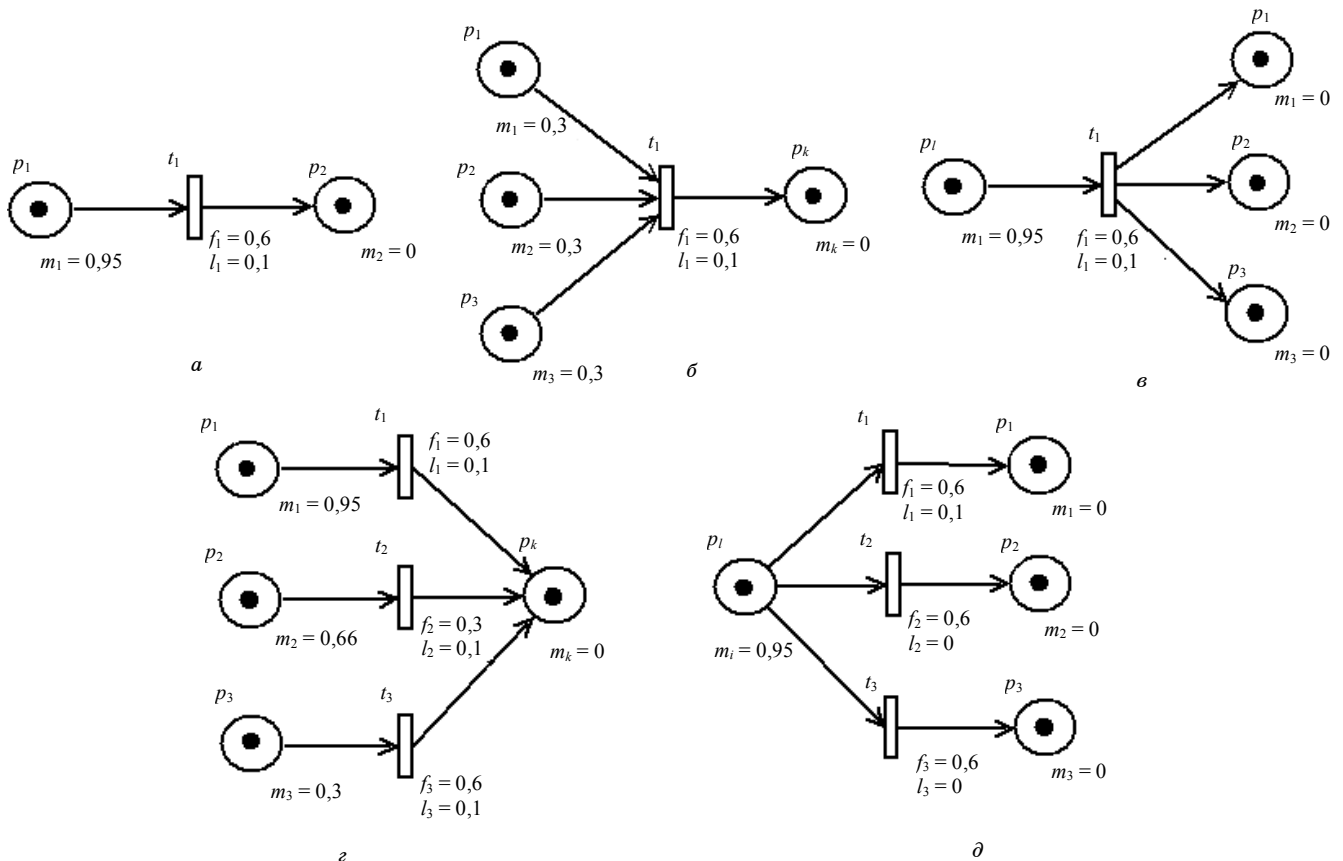


Рис. 1. Типовые правила нечетких продукций, выраженные в виде фрагментов Prolog-ориентированной предикатной сети Петри, где  $l_1, \dots, l_3$  значения порогов срабатываний переходов

Факты вида  $f\_tX()$  задают коэффициенты определенности правил нечетких продукций, факты вида  $l\_tX()$  определяют значение порога срабатывания переходов. Факт  $init([p_1(0,95), p_2(0,66), p_3(0,3), p_k(0)])$  определяет вектор начальной маркировки, где элементы  $px()$  определяют степень нечеткой принадлежности условия каждой из позиций. Следует отметить, что тела кловов  $arc(S0, t_1(X1, Y2), S2)$ , фактически являющиеся функцией охраны переходов, в данном случае реализуют правило срабатывания переходов, характерное для нечетких сетей вида  $C'_f$  [4]:

$$m_j^v = \max\{m_j, \min_{(i \in \{1,2,\dots,n\}) \wedge (I(p_i, t_k))} \{m_i, f_k\}\} \times \\ \times (\forall p_j \in P) \wedge (O(t_k, p_j) > 0),$$

хотя в общем случае правило срабатывания нечеткого перехода может определяться по-иному. Кловы вида  $l\_t_3(L)$ ,  $X1 > L$  обеспечивают контроль порога срабатывания определенного перехода, а кловы вида  $remove([p_k(Y1)], S0, S1)$ ,  $insert([p_k(Y2)], S1, S2)$  обеспечивают смену маркировки при построении графа достижимых состояний (рис. 2).

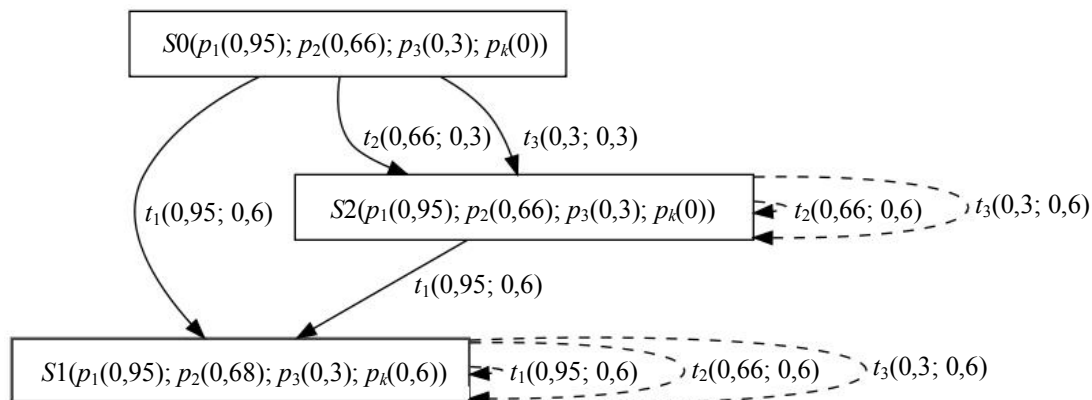


Рис. 2. Граф достижимых состояний для случая, изображенного на рис. 1, г, где  $S0, \dots, S2$  — состояния модели,  $p_1, \dots, p_k$  — значения нечеткой принадлежности меток позиций,  $t_1, \dots, t_3$  — пометка дуг именами срабатывающих переходов, где параметры конкретизация переменных кловов Prolog

Рассмотрим граф достижимых состояний, построенный для случая, изображенного на рис. 1, 2, с точностью до переходов, не меняющих маркировку сети, — состояние  $S1$  является тупиковым для данного фрагмента, таким образом, значение метки  $pk(0,6)$  является значением степени истинности заключения данного правила нечеткой продукции.

Таким образом, любое правило нечеткой продукции может быть с успехом выражено в виде фрагмента Prolog-ориентированной предикатной сети Петри, притом, что никаких модификаций средств анализа и разработки моделей не нужно.

#### Литература

1. Дубинин В. Н. Языки логического программирования в проектировании вычислительных систем и сетей: учеб. пособие/Зинкин С. А. — Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета.
2. Антонов Д. А., Суконщиков А. А. Разработка программного обеспечения верификации свойств моделей, построенных на базе сетей Петри высокого уровня, посредством языка программирования Prolog/Информатизация процессов формирования открытых систем на основе СУБД. САПР, АСНИ и систем искусственного интеллекта. Матер. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. — Вологда: ВоГТУ, 2007. С. 17—21.
3. Zadeh L. A. Fuzzy Algorithms//Inform. a. Control. 1965. V. 12. No. 2. P. 94—102.
4. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 736 с.

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING PROLOG-ORIENTED PREDICATE PETRI NETS FOR PRESENTATION AND ANALYSIS OF THE FUZZY RULES BASED SYSTEMS

D. A. Antonov, A. A. Sukonshchikov  
Vologda State Technical University, Vologda, Russia

*One of the most popular methods in the description of systems operating in parallel and with asynchronously interacting components became an approach that is based on using network models dating back to the networks of a special type proposed by Carl Petri. This paper introduced the method for inclusion uncertainty in the high-level predicate Petri nets interpreted in programming language Prolog, which allows to build and explore the fuzzy models based on them, without changing the verification program.*

**Keywords:** methodology, verification, Petri nets, predicate Petri nets, "Predicate/Transition" nets, fuzzy logic, fuzzy rules based systems, fuzzy modelling.

---

Антонов Дмитрий Александрович, аспирант.  
E-mail: Torious@gmail.ru  
Суконщиков Алексей Александрович, доцент.  
E-mail: avt@vstu.edu.ru

