

# Применение нечёткой логики в PRO-сетях в системе имитационного моделирования процессов проектирования

М. С. Севастьянов

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
msevastyanov@outlook.com

Н. Е. Новакова

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)  
nenovakova@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается математический аппарат PRO-сетей – модификаций сетей Петри, модифицированный нечёткими вычислениями. Аппарат используется как основа для системы имитационного моделирования технологических процессов производства. В статье описывается использование нечёткой логики для организации перехода между состояниями.

**Ключевые слова:** нечёткая логика, имитационное моделирование, PRO-сети, технологические процессы

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современная эпоха развития наукоёмких производств во всём мире характеризуется всё более широкой автоматизацией процессов. Применение автоматизированных систем, позволяющих сократить временные и человеческие ресурсы в области проектирования, является областью с большим потенциалом для внедрения современных новых интеллектуальных средств оптимизации и моделирования.

При внедрении таких сложных инструментов, как системы автоматизированного проектирования (САПР), необходимо учитывать, что плохо проработанное решение по выбору компонентов системы, ресурсов, вариантов их взаимодействия между собой может повлечь различные негативные последствия в виде дорогостоящей замены отдельных компонентов системы либо даже полная её реконфигурация. Поэтому внедрение САПР является достаточно трудоёмкой задачей, которая требует вовлечения высококвалифицированных специалистов.

Говоря о процессе внедрения САПР, стоит обратиться к понятию конфигурации САПР. Конфигурация САПР представляет собой такую логическую организацию системы, которая состоит из описания объекта проектирования, типовых проектных процедур, ресурсов и отношений между ними [1]. Автоматизация процесса моделирования такой конфигурации позволяет заранее выявить и предотвратить негативные последствия от неправильного внедрения САПР.

Для этого требуется применение специальных инструментальных средств [2]. В качестве рабочей модели исследования конфигурации САПР подходят модели, использующие сети Петри, позволяющие моделировать динамические системы и асинхронные

параллельные процессы [3]. В качестве теоретической основы имитационной модели процесса проектирования оптимальным вариантом является использования модификации нечётких сетей Петри, позволяющих учитывать временные характеристики процесса, а также стохастическую неопределённость, возникающую в процессе проектирования.

## II. НЕЧЁТКИЕ СЕТИ ПЕТРИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Сети Петри (СП) – математический аппарат для моделирования динамических дискретных систем, модель для представления структуры и анализа динамики функционирования систем в терминах «условие-событие». Модели сетей Петри позволяют исследовать работоспособность моделируемых систем, оптимальность их структуры, эффективность процесса их функционирования, а также возможность достижения в процессе функционирования определённых состояний. При выстраивании сети Петри оперируют такими понятиями, как маркеры (перемещающиеся по вершинам сети метки), вершины и дуги. Моделирование процесса обеспечивается набором позиций и переходов [4].

Различные модификации СП предоставляют возможности детализации процесса, отображения параллельных процессов, расчёта временных задержек переходов. Одна из таких модификаций, PRO-сеть, описывается формулой:

$$\Phi = (T, P, R, V, M), \quad (1)$$

где:  $T$  – множество переходов;  $P$  – множество позиций;  $R$  – отношение:  $R = L \times T \cup T \times L$  (позиции и переходы определяют дуги);  $V$  – множество глобальных переменных  $v_i$ , доступное для всех процедур перехода  $\pi$  и процедур приоритета  $\rho$ .  $M$  – множество меток на элементах множества  $L$ ;  $\mu_i \in M$  определяется как маркер на  $l_i \in L$ . Этот маркер указывает, что существует некоторое отмеченное условие. Маркеры может иметь определённое число атрибутов:  $\mu = \mu = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$  [2].

При моделировании важно также организовывать анализ на разных уровнях абстрагирования, что и позволяют делать PRO-сети. Такие особенности процессов, подлежащих моделированию, как их протекание во времени, становится возможным

рассматривать при помощи выражения временных задержек процедур.

Также одной из ключевых разновидностей сетей Петри являются *нечёткие сети Петри (НСП)*, чья концепция исходит из необходимости моделировать объекты, имеющих ряд параметров и характер протекающих процессов в которых нельзя строго формализовать [5]. При проектировании технологических процессов возможен ряд нюансов, слабо поддающихся прогнозированию: случайные события, оказывающие существенное влияние на процесс проектирования, возможные дополнительные процессы во время моделирования.

Рассмотрим один из известных подклассов НСП, обозначаемый как  $V_f$ . Его суть в введении описания неопределённости нечёткого характера в начальную маркировку и правила изменения маркировок. НСП  $V_f$  можно определить как:

$$V_f = (P, T, I, O, M_0), \quad (2)$$

где:  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – конечное множество позиций СП;  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$  – конечное множество переходов СП;  $I$  – входная функция переходов;  $O$  – выходная функция переходов,  $M_0$  – матрица начальной маркировки [4].

Сформулируем модифицированную нечёткую PRO-сеть, дополнив возможности детализации, параллельности и временных особенностей процессов, предоставляемых PRO-сетями, наличием нечёткого характера в правилах изменения маркировок, предоставляемых НСП класса  $V_f$ :

$$\Phi = (T, P, R, V, M_0) \quad (3)$$

Отличием от обычных PRO сетей является  $M_0$  – матрица начальной маркировки.

На рис. 1 представлено графическое отображение перехода. Переход представляет собой отрезок линии в случае, когда он – часть определённого далее элемента простой PRO-сети, и прямоугольник, когда переход – часть определённого ниже элемента абстрактной PRO-сети (рис. 1). Входные и выходные дуги связаны с соответствующими позициями перехода. По сути такой простейший элемент PRO-сети – это переход с позициями входа и выхода и дугами. В момент временной задержки маркировки не меняют своего положения. Изменение значений глобальных переменных в момент в момент окончания задержки приводит к изменению маркировки. В этот период запуск других переходов блокируется [2].

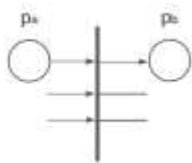


Рис. 1. Конкретный переход простой PRO-сети

Далее рассмотрим нечёткую составляющую модифицированных PRO-сетей, которая выражается в

правилах определения текущей маркировки и срабатывания перехода. Каждый элемент  $m_{ij}^0$  матрицы начальной маркировки  $M_0$  равен значению функции принадлежности наличия  $j$ -1 числа маркеров в позиции  $p_i$  на момент начала её запуска. По определению функции принадлежности элементы матрицы начальной маркировки должны удовлетворять следующему условию:

$$m_{ij}^0 \in [0, 1] \quad (4)$$

Общее количество столбцов матрицы начальной маркировки определяется максимальным количеством вводимых в рассмотрение маркеров в позиции  $\Phi$ , которое в общем случае принимается равным  $d$ .

Рассмотрим в качестве примера нечёткую сеть  $\Phi$ , изображённую на рис. 1. Эта сеть имеет множество позиций  $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$  и множество переходов  $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ . Сеть описывает процесс моделирования автоматизированного проектирования технологических процессов.

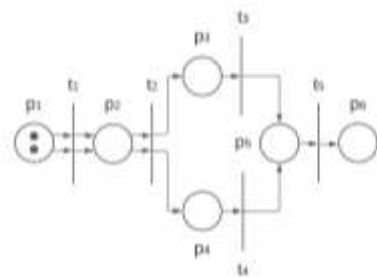


Рис. 2. Пример нечёткой сети Петри, описывающей процесс моделирования автоматизированного процесса проектирования технологических процессов

Для упрощения примера ряд реальных процедур были опущены. Представленные в сети  $\Phi$  переходы:

- $t_1$  – формирование технологического маршрута,
- $t_2$  – формирование технологической документации,
- $t_3$  – определение требований ТБ,
- $t_4$  – расчёт эконо. эффективности,
- $t_5$  – согласование тех. документации с заказчиком.

Начальная маркировка для этой сети может быть задана, как вариант, следующей матрицей:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.6 & 0.8 \\ 0.6 & 0.5 & 0 \\ 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Строки такой матрицы образованы из векторов  $m_i^0 = (m_{i1}^0, m_{i2}^0, m_{i3}^0)$ , в которых каждый компонент определяет степень принадлежности нечёткого наличия  $j$ -1 количества маркеров в позиции  $p_i$  данной НСП. Общее количество вводимых в рассмотрение маркеров равно  $d=3$ .

Процесс изменения маркировок нечёткой PRO-сети происходит согласно установленным *Правилам P*:

- **(P<sub>1</sub>) Правило определения текущей маркировки.** Существует матрица  $M$ , определяющая текущее состояние сети. Каждый элемент такой матрицы удовлетворяют (4) и представляет собой значение степени принадлежности нечёткого наличия маркеров в соответствующих позициях. Матрицей начальной маркировки  $M_0$  определяет начальное состояние.
- **(P<sub>2</sub>) Правило активности перехода.** Активным некоторый переход  $t_k$  считается, если при текущей маркировки  $M$  справедливо следующее условие:

$$o \geq (I(p_1 t_k), I(p_2 t_k), \dots, I(p_3 t_k)) \quad (5)$$

где компоненты вектора  $o$  определяются максимальным индексом отличной от нуля степени принадлежности нечёткого наличия маркеров в позициях нечёткой PRO-сети.

- **(P<sub>3</sub>) Правило срабатывания перехода.** В случае активности перехода  $t_k$  срабатывание данного перехода происходит мгновенно и влечёт за собой формирование новой маркировке  $M$ , каждый элемент которой определяется по следующим правилам:

для каждой из входных позиций  $p_i \in P$ , для которых  $I(p_i t_k) \neq 0$ , по формулам:

$$m_{i1}^y = \max_{(i \in \{1, 2, \dots, I^*(p_i, t_k) + 1\})} \{m_{ij}\}; \quad (6)$$

$$m_{i1}^y = m_{i, j+1}(p_i, t_k) \quad (\forall j \in J \setminus \{1\}). \quad (7)$$

для каждой из выходных позиций  $p_i \in P$ , для которых  $O(p_i t_k) \neq 0$ , по формулам:

$$m_{ij}^y = \min\{m_{ij}, 1 - q_k\} \quad (\forall j \in \{1, 2, \dots, O(t_k, p_i)\}); \quad (8)$$

$$m_{ij}^y = \max\left\{\min\{m_{ij}, 1 - q_k\}, \min\{m_{i, j-O(t_k, p_i)}, q_k\}\right\} \quad (\forall j \in J) \wedge (j > O(t_k, p_i)) \quad (9)$$

где  $q_k$  – степень принадлежности или мера возможности нечёткого срабатывания перехода  $t_k \in T$ , рассчитываемая по формуле:

$$q_k = \min\left\{\max_{(i \in J) \wedge (i > I(p_i, t_k))} \{m_{ij}\}\right\} \quad (\forall t_k \in T); \quad (10)$$

Следуя приведённым правилам, после нечёткого срабатывания перехода  $t_1$  начальная маркировка  $M_0$  изменится на маркировку  $M_1$ , матрица которой равна:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0.8 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.7 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0 & 0 \\ 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Полученная маркировка разрешает переход  $t_2$ , в чём можно убедиться, используя правило  $P_2$ .

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Была разработана система, в основе которой лежит описанный математический аппарат. ПО позволяет производить имитационное моделирование процессов работы с САПР. Описаны типовые проектные и организационные процедуры, представляющие соответствующие им переходы нечёткой модифицированной сети Петри, которая графически приведена на рис. 4.

- $t_1$  – Анализ исходных данных,
- $t_2$  – Анализ типовых ТП,
- $t_3$  – Формирование дерева ТП,
- $t_4$  – Формирование технологического маршрута,
- $t_5$  – Нормирование технологических процессов,
- $t_6$  – Формирование комплекта документации,
- $t_7$  – Определение требований ТБ
- $t_8$  – Расчёт экономической эффективности,
- $t_9$  – Согласование документации со службами,
- $t_{10}$  – Согласование документации с заказчиком.

Измерение времени в имитационном моделировании осуществлялось при помощи метода фиксированного шага, который подразумевает, что отсчёт системного времени происходит посредством интервалов времени заданной длины. У каждой процедуры была описана функция зависимости степени завершенности от времени, сложности объекта проектирования  $C \in [0; 1]$  и параметров необходимых для выполнения каждой процедуры ресурсов.

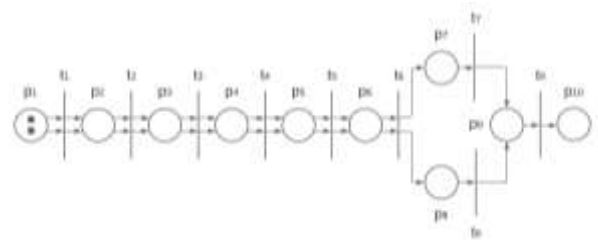


Рис. 3. Процесс моделирования процесса автоматизации проектирования ТП, представленный в нотации сетей Петри

В табл. 1 приведены результаты одного из экспериментов. Указаны временные промежутки использования и простоя использованных ресурсов, а также периоды выполнения проектных и организационных процедур с указанием начала и окончания их выполнения (в минутах).

ТАБЛИЦА I РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Общая информация		
Общая продолжительность выполнения всех процедур:	111 ч 10 мин	
Шаг моделирования (мин):	2	
Ресурсы		
Ресурс	Использование	Простой
Пользователь САПР	166: (1190 – 1228), (1170 – 1190), (1050 – 1088), (80 – 130), (0 – 20)	108 ч 24 мин
КСАП	1112: (1088 – 1170), (130 – 1050), (80 – 130), (20 – 80)	92 ч 38 мин
ЭВМ	1112: (130 – 1050), (80 – 130), (20 – 80), (1088 – 1170)	92 ч 38 мин
Принтер	82 (1088 – 1170)	109 ч 48 мин
Процедуры		
Процедура	Общая прод-ть	Непредв. задержка
t <sub>1</sub>	20 (0 – 20)	-
t <sub>2</sub>	1 ч 0 мин (20 – 80)	56 (24 – 80)
t <sub>3</sub>	50 (80 – 130)	-
t <sub>4</sub>	15 ч 20 мин (130 – 1050)	15 ч 17 мин (132 – 1049)
t <sub>5</sub>	38 (1050 – 1088)	-
t <sub>6</sub>	1 ч 22 мин (1088 – 1170)	43 (1126 – 1169)
t <sub>7</sub>	20 (1170 – 1190)	-
t <sub>8</sub>	38 (1170 – 1208)	-
t <sub>9</sub>	45 ч 0 мин (1208 – 3908)	-
t <sub>10</sub>	45 ч 42 мин (3908 – 6650)	41 (6628 – 6669)

Ниже представлен список использованных ресурсов и переходов, для выполнения которых они необходимы:

- Пользователь САПР (технолог) ( $t_1, t_3, t_5, t_7, t_8$ )
- КСАП (комплекс средств автоматизации проектирования) ( $t_2, t_3, t_4, t_6$ ),
- ЭВМ ( $t_2, t_3, t_4, t_6$ ),
- Принтер ( $t_6$ ).

Логика определения текущего состояния и запуска очередного перехода основана на аппарате нечётких сетей Петри, описанном в разделе II. Также была разработана возможность срабатывания случайных

событий (например, поломка оборудования), способных привести к непредвиденным задержкам во время выполнения проектных и организационных процедур.

Таким образом, можно сделать, что правила запуска переходов, описанные при помощи нечёткой логики, срабатывают корректно и запуск переходов и перемещение маркеров по соответствующим событиям происходит так, как ожидается. Также благодаря особенностям PRO-сетей оказалось возможным учитывать в процессе моделирования импользования ресурсов и рассматривать процедуры во временных рамках.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к модификации PRO-сетей, которые используются в качестве математического аппарата для формализации имитационных моделей процесса автоматизированного проектирования. Рассмотрена возможность применения нечёткой логики для правил маркировки и запуска переходов. Модель обладает достоинствами как обычных PRO-сетей, среди которых соответствие таким свойствам процесса проектирования, как структурированность, итерационность, целенаправленность, стохастичность и длительность, так и нечётких сетей Петри, позволяющих учитывать стохастическую неопределённость, возникающую в процессе проектирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горячев А.В., Новакова Н.Е. Модели и методы принятия проектных решений в распределенных САПР. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 198 с.
- [2] Горячев А.В., Новакова Н.Е. Моделирование процессов в САПР на основе модифицированных сетей Петри. // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, СПб. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 102-105.
- [3] Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984.
- [4] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH [Книга]. СПб.: Изд-во "БВХ-Петербург", 2005.
- [5] Симанков В.С., Толкачев Д.М. Моделирование сложных объектов в режиме реального времени на основе сетей Петри. // Вестник Адыгейского государственного университета, 2015.