

# Моделирование процессов в САПР на основе модифицированных сетей Петри

А. А. Горячев<sup>1</sup>, Н. Е. Новакова<sup>2</sup>

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

**Аннотация.** Рассмотрены особенности процесса автоматизированного проектирования. Представлена модель процессов в САПР на основе модификации сетей Петри. Описана дискретно-событийная модель типовой проектной процедуры.

**Ключевые слова:** САПР; модифицированные сети Петри; имитационное моделирование; позиции; переходы; ресурсы

## I. ВВЕДЕНИЕ

Процесс создания и внедрения САПР является трудоемкой и длительной задачей, требующей участия коллектива высококвалифицированных специалистов: программистов, экспертов, консультантов, инженеров знаний и их согласованных действий с коллективом проектировщиков и администрацией проектной организации. Особо следует выделить начальный этап разработки средств автоматизации проектирования и выбора ресурсов, имеющий большое значение для получения требуемого эффекта от внедрения САПР в конкретных условиях эксплуатации.

Ошибочное, недостаточно продуманное решение по выбору типа компонентов системы и способов их взаимодействия, принятое на ранних стадиях разработки архитектуры САПР, может привести к непоправимым последствиям: существенным изменениям подсистем, замене компонентов, а возможно, и к полной реконфигурации всей системы. Следовательно, необходимо применение специальных инструментальных средств автоматизации разработки архитектуры САПР и оценки качества проектных решений на ранних этапах разработки. Такие инструментальные средства полезны как на ранних этапах проекта, так и при модификации существующей системы. Полная автоматизация процесса формирования архитектуры САПР в настоящее время не может быть достигнута, так как не решена задача синтеза структуры сложных систем.

В качестве рабочих моделей исследования конфигурации САПР можно использовать: модели, построенные на графах; логику предикатов, алгоритмические модели; модели, использующие сети Петри. Наиболее подходящей теоретической основой имитационной модели процесса автоматизированного проектирования является модификацию сетей Петри,

позволяющую учитывать временные характеристики процесса.

## II. СВОЙСТВА ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Процесс автоматизированного проектирования должен обладать следующими свойствами: структурированность; итерационность; целенаправленность; стохастичность; длительность.

Структурированность – это свойство процесса проектирования, которое отражает наличие у процесса определенной структуры, устойчивых связей и отношений между операциями. Итерационность заключается в многократном выполнении операций процесса проектирования и последовательного приближения к конечной цели. Целенаправленность – свойство процесса проектирования, отражающее наличие конечной цели проектирования. Стохастичность процесса проектирования характеризует то, что изменения процесса проектирования во времени точно предсказать невозможно. Длительность – свойство процесса проектирования, отражающее наличие у него временного периода, в течение которого он выполняется. Процесс проектирования не может быть выполнен мгновенно. Помимо вышеперечисленных свойств процесс проектирования должен быть дискретным, динамичным и иметь возможность отражать параллельное выполнение проектных процедур.

Дискретно-событийное моделирование используется для дискретных во времени процессов низкой и среднего уровня абстракции. Дискретно-событийную модель в некотором роде можно рассматривать как схему обслуживания заявок. В соответствии с этим разработана математическая модель, которая позволяет моделировать выполнение проектных процедур [1]. Событийная модель позволяет организовать последовательное выполнение проектных процедур в том же порядке, в котором они выполнялись бы в реальном процессе проектирования. При моделировании основным объектом в системе является токен (некоторая абстрактная задача), который может определенным образом представлять собой ресурсы и имеет определенные характеристики. «Перемещаясь» по блоку, токены становятся в очереди на выполнение к блоку, захватывают и освобождают эти ресурсы.

В модели обрабатывается так называемый токен – задача. У каждого токена есть следующие характеристики:

- сложность объекта проектирования;
- прогресс выполнения;
- время начала обработки блоком;
- время окончания.

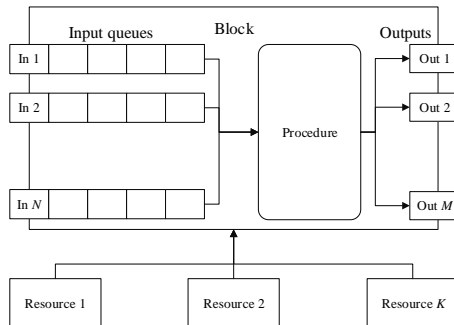


Рис. 1. Модель блока

Разница между временем начала и окончания показывает длительность выполнения задачи. В общем виде алгоритм можно описать с помощью нескольких шагов:

Шаг 1: Запуск стартового токена.

Шаг 2: Токен поступает в очередь обработки первого блока.

Шаг 3: Если прогресс выполнения, обновляющийся итерационно через  $d_i$ , становится равным 1 (100%), то переход на шаг 4.

Шаг 4: Токен удаляется.

Шаг 5: На выходе из первого блока появляется новый токен.

Таким образом, в конце каждой итерации процесс перемещает токены с выходов блоков на входы связанных с ними блоков (рис. 1). В модели есть начальный и конечный блок – начальная и конечная проектная процедура соответственно. У подобных блоков есть особенность: начальный блок не имеет входов, конечный – выходов. При моделировании происходит изменение модельного времени, отличного от реального. Модельное время дискретно, измеряется в тактах. Изменение времени происходит по окончании имитации блока, относящегося к текущему моменту времени. Моделирование процесса проектирования заканчивается, когда исчерпано общее время или выполнены все процедуры.

### III. МОДИФИКАЦИИ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Сети Петри – это аппарат для моделирования динамических систем и асинхронных параллельных процессов [2]. В сетях Петри используются объекты двух типов: статические и динамические.

Основные объекты, посредством которых выстраивается сеть:

- маркеры (динамические метки внутри вершин сети Петри);
- вершины (статический элемент);
- дуги (статический элемент).

Моделирование процесса с помощью сетей Петри происходит с помощью набора позиций и переходов сети. Последовательность перемещения маркеров из входных позиций перехода в выходные позиции образует моделируемый процесс.

PRO-сети – еще одна модификация сетей Петри, предназначенная для моделирования процессов. PRO-сети предоставляют возможности:

- детализации процесса;
- отображения параллельных процессов;
- расчёта временных задержек переходов;
- рассмотрения процесса на разных уровнях абстрагирования;
- отображения атрибутов, средствами которых можно учитывать качество проекта.

Среди модификаций сетей Петри можно выделить Про-сети, предназначенные для моделирования процессов и процессоров. Про-сеть представляет пятерку вида:

$$\Phi = (T, L, R, V, M),$$

где  $T$  – конечное множество переходов (событий);  $L$  – множество позиций (состояний, условий), таких, что  $L = \{ \dots, (l_i, \beta_i), \dots \}$  ( $l_i$  – позиция;  $\beta_i$  – максимальное число сообщений (меток, маркеров), которые допустимы для позиции  $l_i$ );  $R$  – отношение:  $R = L \times T \cup T \times L$ , т. е. позиции и переходы определяют множество дуг;  $V$  – конечное множество глобальных переменных  $v_i$  (переменных среды), доступное для всех процедур перехода  $\pi$  и процедур приоритета  $\rho$ . Если переменные среды  $v_i \in V$  доступны процедурам  $\pi_i$  или  $\rho_i$ , то они не могут быть доступны процедурам  $\pi_j$  или  $\rho_j$  ( $i \neq j$ ) до тех пор, пока существуют ограничения запуска перехода  $t_j$ . В качестве переменной среды могут выступать различные переменные, типы данных которых определяются тем языком, которым описаны процедуры перехода и приоритета;  $M$  – 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. Любой маркер может иметь конечное число атрибутов:  $\mu = \mu = \{ \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n \}$  для  $n \geq 0$ , где атрибуты  $\alpha_i$  имеют различные типы данных: целые, вещественные, логические (для языка процедур  $\pi_i$  и  $\rho_i$ ).

Преимуществами PRO-сетей является возможность описания предусловий запуска переходов, рассмотрения временных особенностей моделирования процесса.

Переход  $t \in T$  определяется как  $(A, B, C, D, \rho, \tau, \Pi)$ , где  $A$  и  $B$  – конечные множества входных дуг с нулем или более элементов;  $C$  и  $D$  – конечные множества выходных дуг с нулем или более элементов;  $\rho$  – процедура приоритета, которая активируется при существовании входных условий для запуска перехода. С ее помощью можно:

- выбрать, но не модифицировать переменные среды и атрибуты меток ближайших входных позиций;
- выбрать входную позицию через дугу  $b \in B$ ;
- выбрать процедуру  $\pi \in \Pi$ , связанную с переходом, и вызвать пробное выполнение;
- отсрочить запуск перехода, если необходимо, пока выходные условия (ограничения) не разрешат запуск перехода;

$T$  – множество задержек времени ( $T \geq 0$ ) между инициализацией и завершением запуска перехода. Задержки времени  $\tau \in T$  могут быть числом или выражением, которому может быть присвоено какое-либо значение.

$T$  и  $\Pi$  связаны попарно  $(\tau, \pi)$ . Процедура приоритета  $\rho$  может:

- выбрать любую переменную  $v_i \in V$ ;
- читать атрибуты меток, расположенных в ближайших входных позициях;
- записывать значения в атрибуты меток, расположенных в ближайших выходных позициях;
- выбрать выходные позиции через дугу  $d \in D$ .

Выбор перехода представляет собой частный случай операции исключающего ИЛИ и определяется как

$$t_{bd} \in T : t_{bd} = (A, \{b\}, C, \{d\}, \rho, \{\tau\}, \{\pi\}),$$

где  $b \in B$  – входная дуга, выбранная с помощью процедуры  $\rho$ ;  $d \in D$  – выходная дуга, выбранная с помощью процедуры перехода  $\pi$ ;  $\pi \in \Pi$  – процедура перехода, выбранная с помощью процедуры приоритета  $\rho$ ;  $\tau \in T$  – задержка времени, связанная с выполнением процедуры  $\pi$ .

Графически переход изображается отрезком линии, если он является частью определенного далее элемента простой PRO-сети, и прямоугольником, если является частью определенного ниже элемента абстрактной PRO-сети (рис. 2). Позиция (условие)  $l \in L$  может иметь максимальное число меток, отмеченное в  $\beta_i$ , где  $0 \leq \beta_i \leq 1$  для выходных позиций в элементе PRO-сети;  $0 \leq \beta_i \leq n$  для выходной позиции абстрактной PRO-сети ( $n$  – целое положительное число).

Позиция (условие)  $l \in L$  может иметь максимальное число меток, отмеченное в  $\beta_i$ , где  $0 \leq \beta_i \leq 1$  для выходных позиций в элементе PRO-сети;  $0 \leq \beta_i \leq n$  для выходной

позиции абстрактной PRO-сети ( $n$  – целое положительное число).

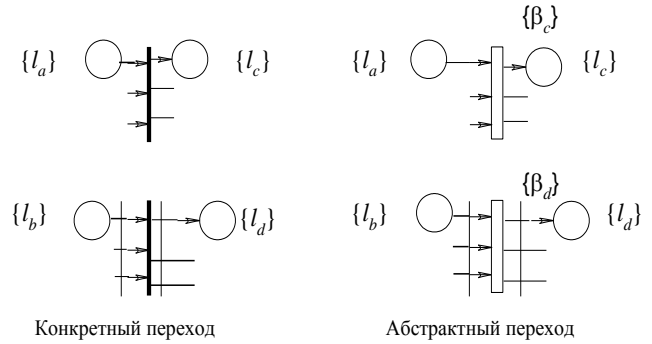


Рис. 2. Типы переходов

Входная позиция имеет только выходящие дуги. Выходная позиция имеет только входящие дуги. Позиция изображается графически в виде окружности, рядом с которой указывается значение  $\beta_i$ . При  $\beta_i = 1$  ограничение числа меток, расположенных в позиции, отсутствует. Правила запуска переходов описаны в таблице.

ТАБЛИЦА I

ТАБЛИЦА РАЗМЕТКА СЕТИ

Маркировка входных позиций	Маркировка выходных позиций
Разметка для первоначального запуска	
1. Метка находится в каждой позиции, соединенной дугой $a \in A$	1. Количество меток в каждой позиции, связанной посредством дуги $c \in C$ , не превышает $(\beta_i - 1)$
2. Метки находятся в одной или более позициях, связанных с помощью дуги $b \in B$	2. Количество меток не превышает $(\beta_i - 1)$ в одной выбранной позиции, связанной с помощью дуги $d \in D$
Изменение маркировки, вызванное запуском перехода	
1. Одна метка удаляется из каждой позиции, соединенной дугой $a \in A$	1. Одна метка добавляется к каждой позиции, соединенной с помощью дуги $c \in C$
2. Одна метка удаляется из единственной выбранной позиции, соединенной с помощью $b \in B$	2. Одна метка добавляется к единственной выбранной позиции с помощью $d \in D$

Элемент простой PRO-сети определяется как переход со своими входными и выходными позициями и дугами. Элемент абстрактной PRO-сети определяется как представление сети, состоящей из конечного числа элементов простой PRO-сети. Маркировки и действия во время запуска сети: в течение временной задержки  $\tau$  ( $\tau \geq 0$ ) метки остаются в таком же состоянии, как и перед запуском. В конце задержки  $\tau$  вступает в силу новая маркировка и меняются значения глобальных переменных. В течение времени  $\tau$  другой запуск этого же перехода не допустим. Для запуска двух видов переходов существуют следующие правила маркировки:

$l_a$  – для запуска перехода все позиции должны быть отмечены;

$l_b$  – хотя бы одна входная вершина должна быть отмечена;

$l_c$  – все выходные вершины должны быть помечены;

$l_d$  – хотя бы одна выходная вершина должна быть отмечена.

Возможна конкатенация (соединение) элементов. Конкретные или абстрактные элементы могут быть соединены путем приравнивания одной или более выходных позиций предшествующего элемента соответствующим входным позициям принимающего элемента:  $l_{out} = l_{in}$ , где  $l_{out}$  – выход элемента-предшественника,  $l_{in}$  – вход элемента-приемника.

PRO-сети дают следующие преимущества. PRO-сети предоставляют возможность рассматривать процесс автоматизированного проектирования на разных уровнях абстрагирования за счет использования абстрактного и детализированного переходов, что позволяет осуществить пошаговую декомпозицию процедурных компонентов по мере накопления знаний о моделируемом процессе. Наличие глобальных переменных и переменных среды, доступные для всех процедур переходов  $\pi$  и приоритетов  $\rho$ , позволяет моделировать процедуры управления и собирать статистику. Гибкая система правил запуска переходов, наличие правил выбора входных позиций  $l_a$  и  $l_b$  по приоритету  $\rho$  и использование двух логических правил выбора входных и выходных позиций (конъюнктивная и дизъюнктивная формы) предоставляют широкие возможности для описания структур различной степени сложности и разрешения конфликтных ситуаций. Использование атрибутов  $\alpha_i$  и переменных среды  $v_i$  позволяет моделировать информационные потоки, а также изменения качества объектов проектирования (изменение проектного описания). Возможность выражения временных задержек процедур  $\tau$  через значение атрибутов  $\alpha_i$  и переменных среды  $v_i$  позволяет рассматривать временные особенности моделируемого процесса. Временные задержки могут быть константами, аналитическими или вероятностными выражениями; возможность описания предусловий запуска перехода и выбора очередности обработки сообщений на языке логики предикатов обеспечивает, с одной стороны, выразительность и простоту сетевого представления, а с другой – возможность перехода к программам имитации на специализированных языках моделирования, например GPSS. Использование атрибутивных параметров и переменных среды, а также логики запуска переходов позволяет отразить особенности взаимодействия процедурных и ресурсных компонентов во временных зависимостях.

Таким образом, PRO-сети обладают следующими свойствами: возможность детализации любого уровня вложенности; возможность организации обратных связей и параллельных процессов; расчет временных задержек переходов; учет качества проекта за счет использования атрибутов. Следовательно, PRO-сети адекватно отражают основные свойства процесса проектирования.

#### IV. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ PRO-СЕТИ

С точки зрения системного подхода желателен простой и естественный переход от общесистемной модели (рис. 3) к конструктивной. С этой целью воспользуемся формальным описанием стратегий и маршрутов проектирования [3].

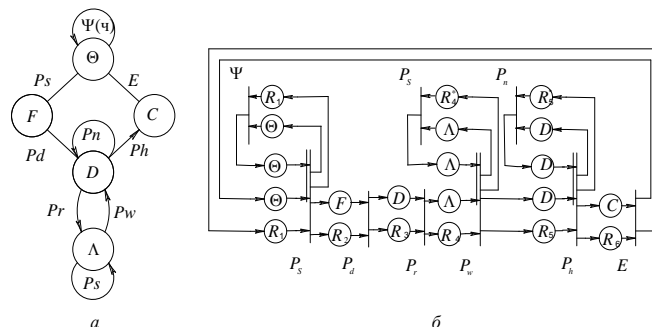


Рис. 3.

На рис. 3 представлен переход для процедуры проектирования технологической оснастки. Для описания системной модели введены следующие обозначения:  $\Theta$  – образы объекта и предметной области в сознании аналитика, проектировщика, программиста и специалиста по тестированию;  $F$  – формализованные задания на выполнение процедур разработки программного продукта;  $S$  – документальное представление результатов моделирования, проектирования и кодирования;  $D$  – постоянная (архивная) информация, хранящаяся в БД, информация о проекте;  $C$  – постоянная справочная информация (ГОСТы, архивы, справочные системы и библиотеки);  $\Lambda$  – внутреннее цифровое описание текущего проектируемого объекта.  $R$  – ресурсы. Базовые операционные компоненты процесса проектирования описаны в [3].

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к формализации имитационных моделей на основе модифицированных сетей Петри. Данная модель соответствует всем свойствам процесса проектирования: структурированность; итерационность; целенаправленность; стохастичность; длительность. Модель позволяет в ускоренном масштабе времени просмотреть множество конфигураций САПР и выбрать оптимальный вариант.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Шеннон Р. Имитационное моделирование систем - искусство и наука: Издательство: М.: Мир, 1978. 420 с.
- [2] Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984.
- [3] Goryachev A.V., Novakova N.E. System of basic operating units of the CAD process // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). 2017. Vol. 1. P. 168–170