

УДК 519.876.5

**ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ СЕТЯМИ ПЕТРИ***Л. Г. Гагарина*, д-р техн. наук; *Д. П. Смирнов*

Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, Россия

Предложена методика моделирования производственных процессов с использованием объектно-ориентированного подхода и расширенных сетей Петри, в качестве математического аппарата.

Ключевые слова: сети Петри, объектно-ориентированное моделирование, производственные процессы, Е-сети.

Развитие информационных технологий способствовало появлению возможности виртуального моделирования производственных процессов предприятий для оценки их эффективности. Изменяя параметры модели, можно оптимизировать процессы, не прибегая к дорогому и сложному анализу реальной системы. Однако с увеличением размера системы, увеличивается сложность ее проектирования, понимание работы модели ухудшается, добавление и изменение элементов вызывает трудности, повторное использование частей модели с небольшими изменениями невозможно.

Применение объектно-ориентированного подхода может помочь решить описанные проблемы. Данный подход даст возможность повторно использовать код (части модели), создание расширяемых библиотек модулей и параллельные разработки одной модели разными людьми.

В основу каждой модели входит некое математическое представление, описывающее ее работу. Отсюда следует, что возможности средств моделирования напрямую зависят от используемого математического аппарата.

Среди множества математических аппаратов для моделирования выделяются сети Петри. Они способны описывать в удобной графической

форме системы с синхронными независимыми событиями, что позволяет более достоверно отображать протекающие процессы в реальных условиях.

Сети Петри представляют собой двудольный ориентированный граф, состоящий из трех статических элементов (позиция, переход, дуга) и одного динамического (метка). Позиции соединены с переходами с помощью дуги, метки хранятся в позициях и перемещаются между ними через переходы. В моделировании они заменяют собой материальные или информационные объекты. Переход из одной позиции в другую в реальной системе соответствует либо физическому перемещению, либо преобразованию объекта.

Наиболее используемыми в моделировании являются не классические сети Петри, а их разновидности. Так, во временной сети Петри переходы имеют вес, определяющий задержку срабатывания. Таким образом моделируется время, необходимое для выполнения одного действия. В цветной сети Петри метки могут различаться по типам, определяя для каждого объекта системы свои условия перехода. Ингибиторная сеть Петри содержит ингибиторные дуги, запрещающие срабатывания перехода, если во входной позиции, соединенной с этой дугой, содержится метка.

Для разработки методики объектно-ориентированного моделирования (ООМ) были выбраны Е-сети [1], исходя из того, что они включают в себя в том или ином виде рассмотренные ранее свойства и имеют развитие в направлении моделирования систем в нескольких работах [2, 3]. Е-сети содержат следующие особенности [4]:

1. позиции могут иметь не более одной входной и не более одной выходной дуги;
2. позиции бывают двух типов:
 - простые (содержат не более одной метки в каждый момент времени),

Гагарина Лариса Геннадьевна, профессор, заведующая кафедрой «Информатика и программное обеспечение вычислительных систем».

Тел. 8 (499) 731-18-11.

E-mail: gagar@bk.ru

Смирнов Дмитрий Петрович, аспирант кафедры «Информатика и программное обеспечение вычислительных систем».

E-mail: smirnovdp@gmail.com

Статья поступила в редакцию 24 июня 2016 г.

© Гагарина Л. Г., Смирнов Д. П., 2016

- очереди (содержат неограниченное количество меток);
- 3. метка может иметь произвольный набор атрибутов;
- 4. каждому переходу можно задать:
 - временную задержку,
 - функцию преобразования атрибутов меток, проходящих через данный переход,
 - разрешающую функцию (определяет зависимость, при которой осуществляется переход).

Доказано [5], что для описания любого производственного процесса достаточно использовать базовый набор типов элементарных сетей. На рис. 1 приведены примеры работы каждой из этих сетей.

Элементарная сеть состоит из набора входных и выходных позиций, одного перехода и условий его работы.

Сеть типа *T* (рис. 1, *a*) служит для увеличения или уменьшения количества меток. Если нет входных или выходных позиций, сеть позволяет

создавать метки или их удалять. Условие срабатывания перехода включает наличие меток во всех входных позициях и их отсутствие в выходных (в случае, если позиция не является очередью). По окончании работы перехода метки вычитаются по одной из входных позиций и добавляются по одной в выходные. Формальное описание примера:

$$P = C(p_1, p_2, p_3) \wedge \sim (C(p_4) \vee C(p_5)),$$

$$M'(p_i) = M(p_i) - 1, M'(p_j) = M(p_j) + 1, \\ i = 1, 2, 3, j = 4, 5,$$

где *P* — условие срабатывания перехода;

C — предикат, принимающий значение единицы, если все аргументы (позиции) имеют метку;

M(p) — маркировка позиции;

M'(p) — результирующая маркировка позиции *p*.

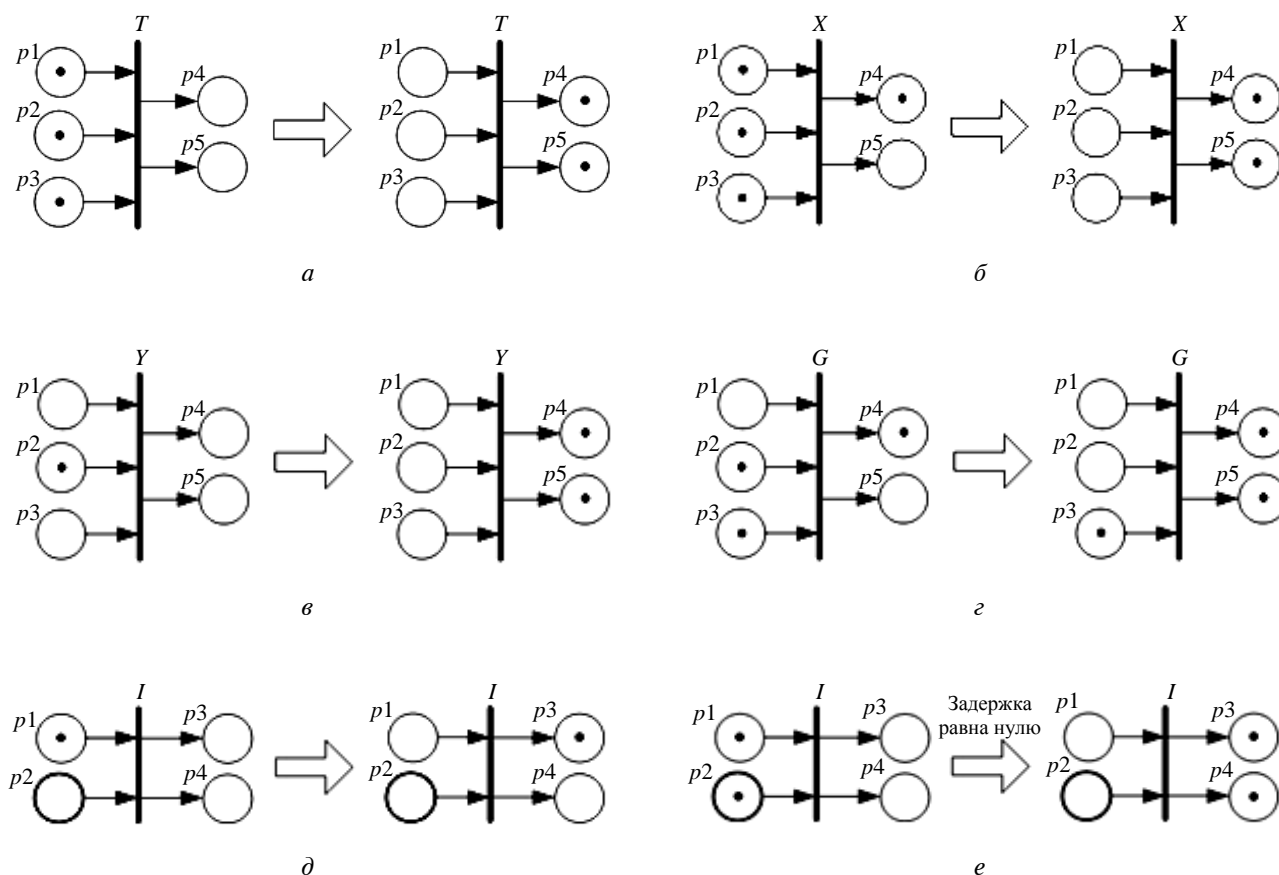


Рис. 1. Примеры работы базового набора элементарных сетей:

a — для уменьшения количества меток; *б* — для преобразования входных меток; *в* — для добавления меток; *г* — объединяет сети, используется для описания маршрутизации; *д, е* — для прерывания текущего действия

Сеть типа X (рис. 1, б) осуществляет преобразование входных меток в одну выходную с выбором позиции. Позволяет описывать процесс распределения и сортировки объектов системы. По умолчанию, для срабатывания перехода необходимо наличие меток во всех входных позициях и отсутствие метки хотя бы в одной выходной позиции (либо позиция должна быть очередь). Формальное описание примера:

$$\begin{aligned} P &= C(p_1, p_2, p_3) \wedge \sim C(p_4, p_5), \\ M'(p_i) &= M(p_i) - 1, \quad i = 1, 2, 3, \\ p &= F(p_4, p_5), M'(p) = M(p) + 1, \end{aligned}$$

где F — функция выбора пустой позиции.

Сеть типа Y (рис. 1, в) выполняет обратное действие элементарной сети X . Выбирается метка из одной входной позиции, и добавляются метки во все выходные позиции. Может применяться для моделирования нескольких источников поступления объектов (поставщики, конвейеры и т. п.). Начальные условия для срабатывания перехода требуют наличия метки, хотя бы в одной входной позиции, и отсутствия меток во всех выходных. Формальное описание примера:

$$\begin{aligned} P &= (C(p_1) \vee C(p_2) \vee C(p_3)) \wedge \sim (C(p_4) \vee C(p_5)), \\ M'(p_i) &= M(p_i) - 1, \quad i = 1, 2, 3, \\ p &= H(p_1, p_2, p_3), M'(p) = M(p) - 1, \\ M'(p_j) &= M(p_j) + 1, \quad j = 1, 2, \end{aligned}$$

где H — функция выбора позиции с меткой.

Сеть типа G (рис. 1, г) объединяет в себе сети X и Y . Выбирается метка из одной входной позиции и добавляется в одну выходную. Сеть подходит для описания маршрутизации. Входные условия совпадают с условиями сети Y , а выходные условия совпадают с выходными условиями сети X .

Сеть типа I (рис. 1, д, е). Предыдущие элементарные сети при выполнении перехода имели установленную задержку d , по умолчанию равную нулю, которую невозможно было отменить или сократить. Данная сеть имеет специальную позицию, позволяющую прервать текущее действие (переход). С помощью нее можно ограничивать операции по времени, моделировать реакцию на нестандартные ситуации и многое другое. Сеть имеет две входные и две выходные позиции. Выделенная на рисунке позиция является прерывающей. При появлении в ней метки, действия, происходящие в переходе, мгновенно прекращаются, и метки уходят в вы-

ходные позиции. Имеется три возможные ситуации, описанные формальными выражениями:

1. $P = C(p_1) \vee \sim C(p_2) \vee \sim C(p_3),$
 $M'(p_1) = M(p_1) - 1, M'(p_3) = M(p_3) + 1,$
2. $P = \sim C(p_1) \wedge C(p_2) \wedge \sim C(p_4),$
 $M'(p_2) = M(p_2) - 1, M'(p_4) = M(p_4) + 1,$
 $d = 0,$
3. $P = C(p_1) \wedge C(p_2) \wedge \sim C(p_3) \wedge \sim C(p_4),$
 $M'(p_1) = M(p_1) - 1, M'(p_3) = M(p_3) + 1,$
 $M'(p_2) = M(p_2) - 1, M'(p_4) = M(p_4) + 1,$
 $d = 0.$

Математический аппарат выбран, но для организации ООМ необходимо определить основные понятия.

Объект — сущность, представляющая собой функциональную сеть Петри, объединяющую в себе элементарные сети, позиции, список связей, переменные, методы преобразования данных, порты входа/выхода для связи с другими объектами и порт для установки начальных значений выбранных позиций. Объект схож с понятием класса в объектно-ориентированном программировании (ООП), он также обладает возможностью наследования, создания экземпляров и свойствами полиморфизма и инкапсуляции.

Экземпляр объекта (элемент) — копия объекта с заданными начальными значениями. В ООП он близок по значению к понятию экземпляра класса.

Элементарная сеть — сеть вида T, X, Y, G или I .

Позиция — представляет собой позицию сети Петри. Бывает двух видов: "простая" и "очередь". "Простая" позиция может содержать не более одной метки. "Очередь" способна хранить в себе множество меток, теоретически неограниченное.

Позиция "очередь" передает метки в переходы в зависимости от выбранного типа упорядочивания. По умолчанию устанавливается тип упорядочивания *FIFO* (*First In, First Out* — "первым пришел — первым ушел"), возможен выбор обратного порядка *LIFO* (*Last In, First Out* — "последним пришел — первым ушел"). Также есть возможность самому определить метод, по которому будет производиться упорядочивание меток.

Список связей — описание связей между элементарными сетями, а также экземплярами других объектов.

"Переменная" — элемент, позволяющий хранить в себе целочисленные, вещественные и бу-

левого типа данные. Может входить как в состав объекта, так и располагаться вне его. В зависимости от расположения "переменная" обладает локальной или глобальной областью видимости.

Методы преобразования данных — объединенный набор команд и условий, отвечающих за изменение значений переменных и атрибутов меток. Метод может содержать команды записи текстовой информации в журнал моделирования.

Порты входа/выхода — виртуальные позиции, с помощью которых связывается сеть Петри данного объекта с сетями других объектов. Если в объекте не заданы порты входа и выхода, то объект считается абстрактным и его возможно только унаследовать.

Порт для установки начальных значений выбранных позиций дает возможность для позиций объекта задавать начальное расположение меток с указанными атрибутами.

Атрибуты меток — изменяемые параметры, закрепленные за меткой и сохраняемые при переходе метки из одной позиции в другую.

Конечная модель состоит из связанных между собой элементов. Начальной точкой построения для компилятора является основной объект *Main*. Нельзя создавать элементы от этого объекта и наследовать его, однако остальными свойствами других объектов он обладает. Он также может наследоваться от любого объекта, объединять в себе элементы и содержать описание сети. Имеется возможность создать модель в одном основном объекте, но тогда теряются преимущества объектно-ориентированного подхода. Входные и выходные порты в объекте *Main* отсутствуют, так как в нем формируется конечная модель и не предполагается дальнейшая связь позиций.

Одной из важных частей ООП и ООМ является наследование. В ООМ производные объекты (наследники) получают возможности базового класса, что позволяет использовать код несколько раз. Фактически все параметры копируются, включая таблицу связей и все объявленные порты. Наследник может дополнить и переопределить любые параметры базового объекта, если в последнем не стоят запрещающие модификаторы доступа (*private*). Все это дает возможность создавать готовые библиотечные объекты, которые можно использовать в разных проектах, в случае необходимости, через наследование их модифицировать, не внося изменений в код библиотеки.

Связывание подсетей в единую модель в ООМ строится на использовании общих позиций. На рис. 2 показано как два элемента свя-

зываются между собой. Они имеют общую позицию, которая задается в объекте элемента *elm1* и назначается в нем же как выходной порт *out1*. В элементе *elm2* к входному порту *in1* подключается выходной порт *elm1:out1*, а полученное соединение используется как внутренняя позиция. Случай, когда объект элемента включает в себя элемент другого объекта, изображен на рис. 3. Позиция *p3* входящая в элемент *elm3* связана с входным портом *in1* элемента *elm4*, тем самым *elm4* получает доступ к данной позиции и может с ней работать, как со своей. Выходной порт *elm4:out1* используется в основном элементе как внутренняя позиция.

Начальное расположение меток в модели указывается отдельно. Тем самым появляется возможность пробовать различные варианты их расположения, не меняя описание модели. Метки можно устанавливать только в позициях объекта, указанных в списке портов установки начальных значений. Поскольку позиции в объектах могут именоваться одинаково, а на один объект может быть создано несколько экземпляров, доступ к позиции осуществляется через имя созданного элемента. В случае, когда один элемент входит в состав другого, обращение к позиции производится через перечисление элементов, начиная с последнего. Например: *elm2.elm1.p1*. Здесь элемент *elm1* содержит позицию *p1* и входит в состав *elm2*, который используется в создании конечной модели. При увеличении количества вхождений увеличивается последовательность имен (*elm3.elm2.elm1.p1*).

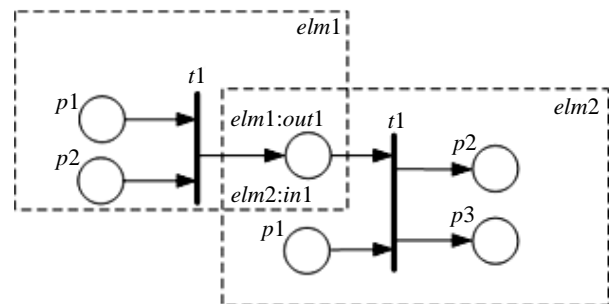


Рис. 2. Связывание двух элементов

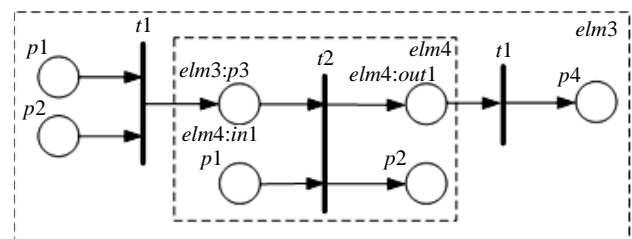


Рис. 3. Вхождение одного элемента в состав другого элемента

Для примера использования ООМ рассмотрим логистику некоторого гипотетического производственного предприятия. Его основными процессами будет закупка материалов и деталей у поставщиков, организация поставки, производство и сбыт готовой продукции. На рис. 4 описана схема связи объектов модели работы данного предприятия. "Доставка" является абстрактным объектом. В ней содержатся связанные с процессом доставки основные функции, схемы взаимодействия и т. п. От нее наследуются объекты: "Авиа", "Железнодорожная", "Грузовым автомобилем". В них "Доставка" дополняется особенностями, характерными для данного типа транспорта, и вводятся порты входа и выхода для возможности взаимодействия на уровне элементов. Объект "Организация доставки" содержит в себе экземпляры предыдущих объектов и отвечает за выбор одного из них в зависимости от условий. Поскольку наше предприятие закупает материалы и детали, необходим объект "Поставщик", который включает в себя описание процессов, связанных с поставкой. Данная сущность не является абстрактной (т. е. содержит порты входа и выхода), но имеет наследников в виде объектов "Поставщик № 1" и "Поставщик № 2". Все три объекта представляют

собой отдельных поставщиков со своими особенностями поставки материалов. За работу с ними на стороне предприятия отвечает "Служба закупки". Объект аккумулирует в себе всех поставщиков в виде элементов и использует экземпляр объекта "Организация доставки" для формирования процесса закупки. В оставшихся нерассмотренными объектах "Сбыт" и "Производство" описанные процессы соответствуют своим названиям. Как видно из схемы, продажа конечной продукции включает в себя ее доставку. Итоговая модель предприятия собирается из элементов трех основных сущностей в объекте "Main".

Заключение

Разработанная методика моделирования на сетях Петри позволяет сократить время на создание моделей и на осмысление архитектуры уже созданных. Появляется возможность формирования библиотек готовых объектов, которые могут быть расширены с помощью наследования для конкретных задач. Развитие данного направления имеет перспективы и требует дальнейшей разработки, одним из пунктов которой является создание языка описания по данной методике.

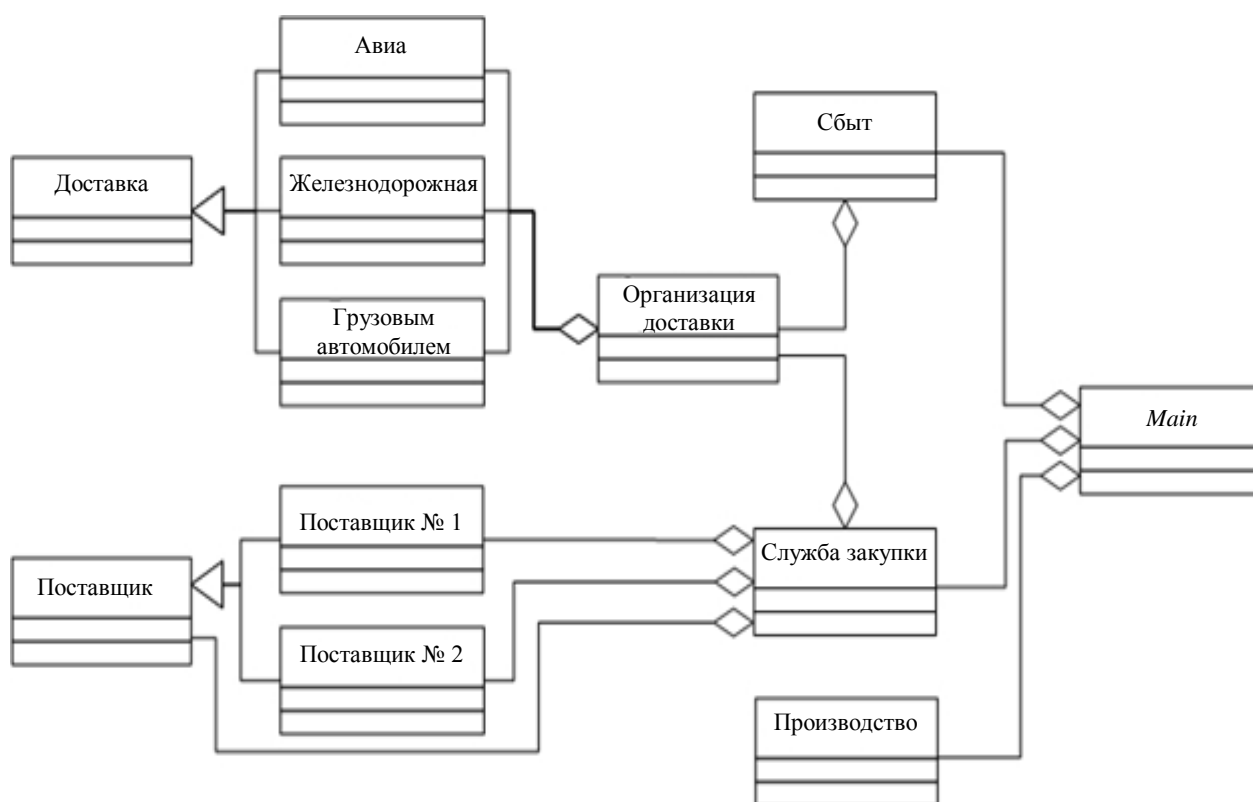


Рис. 4. Схема связи объектов модели работы предприятия

ЛИТЕРАТУРА

1. Nutt G. J. Evaluation Nets for Computer System Performance Analysis // AFIPS FJCC. 1972. V. 41. Pt. 1. P. 279—286.
2. Илющечкина Л. В. Разработка средств моделирования для исследования систем распределенной обработки информации: дис. канд. техн. наук 05.13.01. — М., 2002. — 240 с.
3. Костина С. А. Моделирование логистических процессов в распределенных производственных системах сетями Петри: дис. канд. техн. наук 05.13.06. — М., 2005. — 212 с.
4. Дмитриева Е. А. Система E-сетевого имитационного моделирования EVA. Томск: изд-во ТПУ, 1994. — 31 с.
5. Костин А. Е. Модели и алгоритмы организации распределенной обработки данных в информационных системах: докт. дис. — М., 1989.

OBJECT-ORIENTED MODELING OF MANUFACTURING PROCESSES PETRI NETS

L. G. Gagarina, D. P. Smirnov

National Research University of Electronic Technology "MIET", Moscow, Russia

A method for simulation of production processes using an object-oriented approach and extended Petri nets, as the mathematical apparatus.

Keywords: Petri nets, object-oriented modeling, manufacturing processes, E-nets.

Bibliography — 5 references.

Received Juny 24, 2016