

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



**СВЕТЛАНА  
КОСТИНА**  
ЗАО «Современные  
Беспроводные  
Технологии»,  
начальник  
отдела  
материально  
технического  
снабжения

Принимая во внимание усложнение задач, решаемых в современных логистических системах, возникает необходимость в формальных моделях, которые учитывали бы распределенный характер логистической системы, были бы адекватны такой системе и позволяли бы описывать ее и анализировать ее поведение в терминах одновременно возникающих событий и параллельных развивающихся процессов.

Одна из таких формальных моделей, которая часто применяется в области информационных распределенных систем и которая может оказаться эффективной и при исследовании логистических систем — это сети Петри [4]. Однако этот аппарат, несмотря на его достоинства, пока еще не привлек должного внимания исследователей в области теории и практики логистических систем.

## ЛОГИСТИКА В ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ФИРМЫ (ПРЕДПРИЯТИЯ) И ЛОГИСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КАК РАСПРЕДЕЛЕННАЯ МАТЕРИАЛЬНО- ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА

Логистические операции и технологии включают транспортировку, поддержание рационального уровня запасов, обработку заявок, управление складированием, различные операции с материалами, стандартизацию сервиса и общее планирование производства товара и оказания сервиса [1]. Хотя логистика применялась с давних пор, она нуждается в новых методах и средствах для описания, анализа и моделирования все более и более сложных логистических систем. Потребность в новых методах и средствах особенно велика в России, где логистическим технологиям стали уделять серьезное внимание лишь в последние 10—15 лет [2], [3].

Основная логистическая цепь промышленной фирмы проиллюстрирована на Рис. 1. Здесь видно, что физический канал поставок охватывает пространственный и временной промежуток между поставщиками и производством, а физический канал распределения относится к пространственному и временному промежуткам между производством и потребителем.

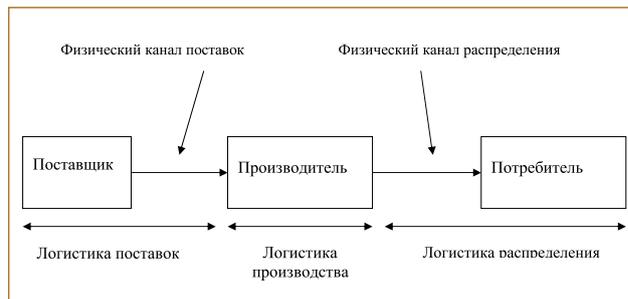


Рисунок 1

Основная логистическая цепь фирмы-производителя

Известное в компьютерных науках определение распределенной системы [5] может быть распространено на логистическую систему следующим образом. Логистическая система — это распределенная материально-информационная система, образуемая множеством взаимосвязанных активностей, которые координированно реализуют логистические задачи с использованием материальных и информационных объектов, перемещающихся в транспортных и коммуникационных сетях, связывающих структурные компоненты основной логистической цепи.

Информационные объекты логистической системы — это идентифицируемые сообщения, такие как требования, запросы, заявки, уведомления и т.д. Материальные объекты — это сырые материалы, компоненты изделий, производимые товары, подвижные средства транспортных систем, ячейки складов, тара и т.д. Информационные и материальные объекты образуют дискретные потоки с определенными операциями на этих объектах.

Будучи распределенной системой, логистическая система в принципе может быть исследована методами, применяемыми для изучения распределенных информационных систем, такими как конечные автоматы, сети систем массового обслуживания, исчисление взаимодействующих систем и система временной логики. Однако, применительно к логистическим системам, перечисленные методы либо недостаточно эффективны, либо громоздки, либо не позволяют наглядно выразить параллелизм возникающих событий и протекающих процессов. С учетом характера логистических систем, более подходящим аппаратом являются сети Петри и, в частности, расширенные сети Петри.

## РАСШИРЕННЫЕ СЕТИ ПЕТРИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Расширенные сети Петри принадлежат к классу временных (то есть имеющих атрибут времени) цветных сетей Петри. Их детальное описание дано в работе [6]. Данные сети могут быть использованы для описания любых алгоритмов обработки информации, в том числе — для описания поведения распределенных информационных систем. Еще одной важной причиной выбора

### АННОТАЦИЯ

Обоснован взгляд на логистическую систему как распределенную материально-информационную систему и показано применение сетей Петри в качестве формального аппарата для анализа и моделирования логистических систем. Создана и исследована имитационная модель основной логистической цепи промышленной фирмы.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Логистические системы, моделирование, сети Петри.

### ANNOTATION

A view on a logistic system as a distributed material and information system is presented in the article. The applying of Petri nets as a formal apparatus for analysis and modeling of logistic systems is showed. A simulation model of the main logistic chain of an industrial firm is created and investigated.

### KEYWORDS

Logistic systems, modeling, Petri nets.

этих сетей в данной статье является наличие их эффективной программной поддержки в форме системы имитационного моделирования Winsim [7], [8].

Как и в общих сетях Петри, минимальные структурные элементы в расширенных сетях Петри — это позиции, переходы и ориентированные дуги, которые соединяют позиции и переходы в соответствии с правилами ориентированного двудольного графа. Динамическими элементами сети являются фишки. Поведение расширенной сети Петри выражается срабатыванием переходов и последующим движением фишек из входных позиций в выходные позиции сработавшего перехода.

Минимальным и функционально полным структурным компонентом расширенных сетей Петри является элементарная сеть, которая математически есть двудольный граф, состоящий из перехода и соединенных с ним позиций. В целом, элементарная сеть отражает четыре фундаментальных системных процесса: перенос информации, управление, задержку времени и преобразование информации.

Было показано [6], что для моделирования любых систем обработки данных расширенными сетями Петри достаточно использовать базовый набор из пяти типов элементарных сетей. Соединяя друг с другом элементарные сети из базового набора типов, можно создавать сети Петри произвольного размера и сложности.

Для текстового описания Петри-сетевых моделей служит язык MDL (Model Description Language), на котором сетевая модель выражается в форме набора взаимосвязанных модулей, или сегментов.

В общем случае законченная Петри-сетевая модель, представленная на MDL, состоит из одного, двух или более сегментов. Информационные связи между сегментами в сетевой модели обеспечиваются только фишками, имеющими атрибуты и перемещающимися из одного сегмента в другой через внешние позиции, выбранные для связывания сегментов.

В дополнение к языку MDL, в системе Winsim реализован также язык управления моделированием MCL (Modeling Control Language). MCL предназначен для установки параметров готовой имитационной модели перед началом ее прогона.

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ И СТРУКТУРА МОДЕЛИ

Цель имитационного моделирования логистической системы состоит в изучении поведения этой системы в зависимости от различных параметров. Построенную имитационную модель можно затем использовать практически для выбора такого набора параметров логистической системы, который обеспечивает наиболее эффективное ее функционирование с точки зрения некоторого критерия или нескольких критериев.

В основу построения имитационной модели положена основная логистическая цепь (Рис. 1). Производитель (фирма), поставщик компонентов и потребители продукта, производимого фирмой, взаимосвязаны и функционируют параллельно во времени. Поскольку, кроме того, эти три типа объектов находятся в разных географических точках, мы имеем подлинную распределенную систему.

Ввиду недостатка места, ниже дается лишь краткое описание трех основных типов подсистем в логистической системе промышленной фирмы.

**Производственный блок со складом.** Для этого звена основной логистической цепи (Рис. 1) входами, стимулирующими производство, являются требования потребителей на продукты фирмы. В модели предполагается, что фирма занимается сборочным производством на нескольких параллельно работающих линиях, с использованием компонентов, покупаемых у поставщиков. Предполагается, что вначале склад фирмы имеет определенный уровень запаса некоторого абстрактного продукта, измеряемый в единицах продукта. Для упрощения

модели предполагается также, что фирма производит только один вид продукта.

Как только текущий уровень запаса на складе фирмы становится ниже заранее определенного уровня  $SMIN$ , начинается процедура пополнения запаса путем закупки необходимых компонентов от поставщиков и последующего производства соответствующего числа единиц продукта.

Условие запуска процедуры пополнения запаса продукта можно записать в следующей форме:

если  $STOK$  — (размер требуемой партии в очереди)  $< SMIN$ , то  $REPL = SMAX - STOK +$  (размер требуемой партии в очереди),

где  $STOK$  — текущий уровень запаса на складе,  $SMAX$  — максимально допустимый уровень запаса,  $SMIN$  — минимально допустимый уровень запаса,  $REPL$  — число пополняемых единиц продукта.

В модели предполагается, что каждая единица продукта, создаваемого фирмой, требует  $M$  типов компонентов, причем от одного поставщика можно получать компоненты только одного типа.

Заявки  $M$  поставщикам рассылаются фирмой параллельно через коммуникационную систему со случайными задержками (телефон, факс, электронная почта, Web-служба и т.п.). Для простоты законы распределения вероятностей случайных задержек предполагаются равномерными, но с разными предельными параметрами для разных типов передачи сообщений.

Фирма, заказавшая компоненты, может начать производить продукт только после того, как все типы компонентов от всех поставщиков окажутся на складе. Как уже отмечалось, производство единиц продукта фирмой идет на нескольких линиях сборки параллельно. Каждая единица произведенного фирмой продукта поступает на склад. Всего производится  $REPL$  единиц продукта. Параллельно с производством единиц продукта, осуществляется отгрузка партий готового продукта потребителям, в соответствии с их заявками.

**Поставщик компонентов.** В данной модели каждый поставщик может поставлять компоненты только одного типа. В момент поступления заявки затребованная партия компонента либо имеется у поставщика, либо он должен ее произвести, либо купить в другом месте.

Таким образом, поставщик характеризуется двумя случайными задержками времени. Первая задержка равна длительности производства или покупки отсутствующего компонента. Вторая задержка вызывается упаковкой и отгрузкой затребованной партии компонента.

В ответ на заявку, поставщик рано или поздно посылает затребованную партию некоторого компонента. Доставка партии осуществляется через распределенную транспортную систему, которая включает в себя авиа- и автотранспорт, железные дороги, водный транспорт и даже почтовую, со случайными интервалами доставки. Предполагается, что тип коммуникационной системы (для пересылки заявки поставщику) и вид транспортной системы (для доставки партии компонентов фирме-заказчику) определяются фирмой.

**Потребитель.** В создаваемой модели потребитель делает последовательные заявки на продукт фирмы партиями. Длительность подготовки новой заявки случайна, она подчиняется экспоненциальному закону распределения вероятностей с заданным средним значением [9]. Каждая заявка содержит требуемое от фирмы случайное число единиц производимого продукта.

Потребитель отправляет свои заявки через распределенную коммуникационную систему (телефон, факс, электронная почта, Web-служба, регулярная почта и экспресс-почта). Заявленная партия единиц продукта доставляется от фирмы через транспортную систему, включающую те же виды транспортных средств, как и при доставке партий компонентов от поставщика фирме.

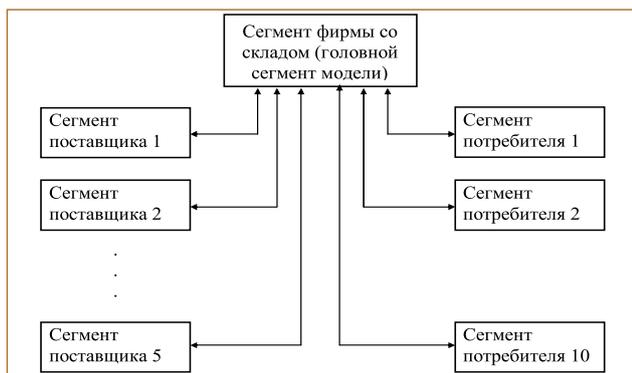


Рисунок 2  
Сегментная структура модели логистической системы промышленной фирмы

Модель логистической системы промышленной фирмы разработана с использованием расширенных сетей Петри в системе имитационного моделирования Winsim [7], [8].

Структурно разработанная модель состоит из одного сегмента производственного блока фирмы со складом, 5 сегментов поставщика и 10 сегментов потребителя (Рис. 2).

Реализованная на MDL, модель состоит из четырех текстовых файлов FIRM.JOM, SUPPLR.JOM, SELLER.JOM и FIRM.JZP (Рис. 3). Файл FIRM.JOM представляет собой головной сегмент, осуществляющий функции производственного блока и склада фирмы. Файлы SUPPLR.JOM и SELLER.JOM являются сегментами поставщика и потребителя соответственно. Наконец, файл FIRM.JZP содержит предложения языка задания параметров MCL, вводимые в модель в начале ее решения.

#### ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Скомпонованная в Winsim модель перед началом каждого ее запуска должна быть параметризована. В частности, для головного сегмента модели, представляющего производственный блок фирмы со складом, параметрами являются начальное значение запаса STOK единиц готового продукта, максимальное и минимальное значения запаса SMAX и SMIN, а также параметры используемых законов распределения вероятностей всех случайных величин.

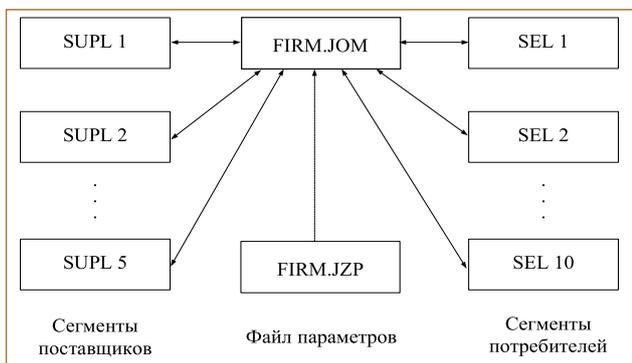


Рисунок 3  
Полная файловая структура модели логистической системы

Желаемые значения параметров для решения модели вводятся пользователем-экспериментатором из заранее подготовленного текстового файла FIRM.JZP.

Для оценки функционирования модели в данной работе выбраны две метрики (характеристики). Первая метрика — это средний интервал между моментом последнего удовлетворенного требования потребителя и моментом удовлетворения первого требования потребителя после начала пополнения запаса готового продукта из компонентов, заказанных фирмой у поставщиков. Эта метрика представляет собой время, в течение которого

фирма приостанавливает обслуживание требований потребителей ее продукта (Рис. 4). Очевидно, что значение данной метрики должно быть минимизировано, но при этом фирма не должна постоянно держать слишком большой запас готового продукта на складе, так как это приведет к увеличению его стоимости из-за складских расходов.

Вторая метрика есть среднее время ожидания выполнения требования потребителем. Это время начинается с момента посылки требования на партию продукта фирме и завершается доставкой партии потребителю. Ясно, что эта метрика очень важна для потребителя и служит критерием выбора им нужной фирмы.

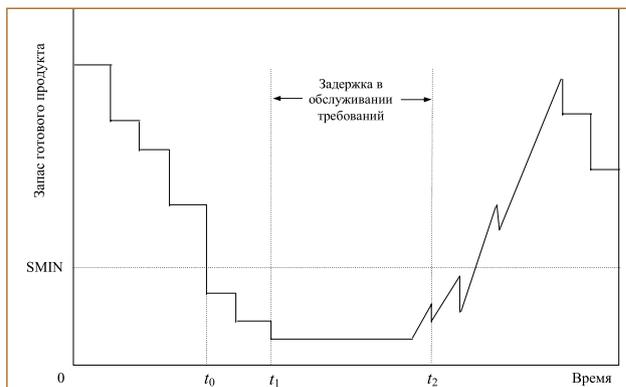


Рисунок 4  
Возможное поведение запаса готового продукта фирмы при заданном минимальном уровне SMIN

Варьируемым параметром модели является величина SMIN, которая используется в условии запуска процедуры пополнения запаса готового продукта фирмой. Выбор параметра SMIN в качестве варьируемого параметра был продиктован его ролью для фирмы и потребителя. Увеличение значения SMIN сокращает среднее время ожидания затребованной партии продукта от фирмы потребителем, что является выгодным для потребителя. Но это ведет к увеличению среднего запаса готового продукта.

Как известно, числовые характеристики, получаемые в результате имитационного моделирования, являются оценками неизвестных точных значений. Их точность определялась с помощью доверительных интервалов [10], [11].

#### ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЬЮ И ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

Имитационные эксперименты проводились из расчета полной годовой активности фирмы в минутах модельного времени. Таким образом, каждый прогон модели охватывал 365 дней\*24 часа\*60 минут = 525600 минут модельного времени. Реальное компьютерное время одного прогона имитационной модели составляло доли секунды.

Были использованы следующие значения переменной SMIN: 50, 100, 150, 200, 250 и 300 единиц продукта. Для каждого из этих значений выполнялось прогонов модели. При каждом прогоне определялась средняя длительность приостановки обслуживания требований потребителя фирмой ( $T_{пр}$ ) и среднее время ожидания выполнения требования потребителем ( $T_{ож}$ ). По совокупности прогонов модели (для каждого значения SMIN) вычислялись также доверительные интервалы этих двух характеристик.

На Рис. 5 показана лишь зависимость общего среднего значения  $T_{пр}$  от SMIN. Из рисунка видно, что средний интервал приостановки обслуживания требований потребителей,  $T_{пр}$ , существенно зависит от минимального уровня запаса единиц готового продукта SMIN. Видно, что чем больше значение SMIN, тем меньше  $T_{пр}$ . Однако, как уже отмечалось, увеличение значения SMIN ведет к увеличению среднего запаса компонентов и готового продукта на складе фирмы и поэтому может невыгодно повлиять на стоимость готового продукта.

Созданная модель иллюстрирует, прежде всего, адекватность аппарата расширенных сетей Петри для описания и имитационного моделирования логистических систем и их компонентов. Она позволяет численно оценивать динамику (поведение) логистической системы промышленной фирмы при варьировании разнообразных параметров, задаваемых экспериментатором в форме отдельного текстового файла.

Модель может быть расширена для количественной оценки поведения запаса готового продукта на складе фирмы, и на этой основе определяется такой рациональный минимальный запас готового продукта, при котором потребители не будут испытывать необоснованно длительные ожидания доставки партии затребованного продукта. Наконец, модель может быть обобщена на случай производства различных видов продукта фирмой. Все это позволяет использовать такую модель в качестве важного источника информации при принятии решений, относящихся к производственной активности фирмы.

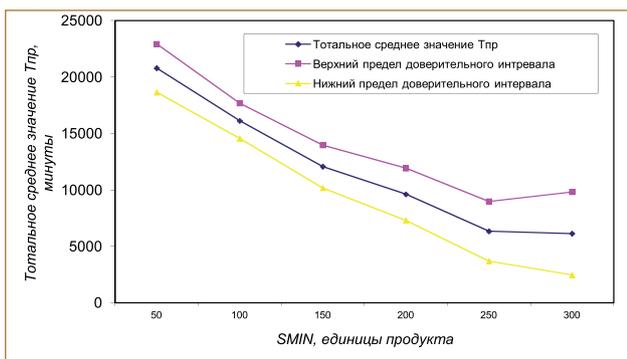


Рисунок 5

Экспериментальная зависимость общего (или тотального) среднего значения  $T_{пр}$  (интервала приостановки обслуживания требований потребителей) от  $SMIN$ , вместе с 95%-ми доверительными интервалами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Созданная Петри-сетевая имитационная модель позволяет количественно оценивать поведение логистической системы при варьировании ее разнообразных параметров. Практическая значимость созданной модели состоит в возможности ее применения для принятия решений в реальной логистической системе. При необходимости модель может послужить основой для реализации ее различных модификаций и обобщений с целью учета новых аспектов в поведении логистической системы промышленной фирмы. Модель может использоваться также в качестве практического программного средства для предварительного испытания новых стратегий в поведении фирмы, а также для выявления и устранения «узких» мест в этих стратегиях.

### Библиографический список:

1. Bowersox D.J. and Closs D.J., *Logistical Management: The Integrated Supply Chain Process*, — New York, McGraw-Hill, 1996.
2. Миротин Л.Б., Ташбаев Ы.Э., *Системный анализ в логистике*. — М.: Изд-во «Экзамен», 2002.
3. Миротин Л.Б., Ташбаев Ы.Э., Порошина О.Г., *Эффективная логистика*. — М.: Изд-во «Экзамен», 2003.
4. Питерсон Дж., *Теория сетей Петри и моделирование систем*, Пер. с англ., Под ред. В.А. Горбатова. — М.: Мир, 1984.
5. Coulouris G., Dollimore J. and Kindberg T., *Distributed Systems: Concepts and Design*, 3rd ed., Addison-Wesley, 2001.
6. Костина С. А. *Моделирование Логистических Процессов в Распределенных Производственных Системах*, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, МИЭТ. — Москва, 2005.
7. Kostin A. and Ilushechkina L., *Winsim: A Tool for Performance Evaluation of Parallel and Distributed Systems*, LNCS, 3261, Springer, Berlin, 2004.
8. Kostin A. and L. Ilushechkina L., *Winsim: Software and Manual*, available at <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets/tods/quick.htm>, 2003.
9. Кофман А., Крюон Р., *Массовое обслуживание: Теория и приложения*. Пер. с франц. под ред. И.Н. Коваленко. — М.: Мир, 1965.
10. Вентцель Е.С., *Теория вероятностей*, Москва, Физмат, 1962.
11. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., and Nicol D.M., *Discrete-Event System Simulation*, 4th ed., Prentice Hall, 2005.



**WMS EXPO. 18 апреля 2012 года,  
КВЦ «Сокольники», павильон №7а**

**Третья международная выставка-конференция,  
посвященная инновациям  
и автоматизации работы склада**

**Организатор: ООО «ММГ Холдинг»**

### Программа конференции:

- Сессия №1.** Инновации в работе современного склада
- Сессия №2.** Автоматизация работы склада производственной компании
- Сессия №3.** Автоматизация работы склада торговой компании

В рамках конференции будет представлен эксклюзивный обзор российского рынка WMS-систем за 2011-й год (готовит журнал «Складской комплекс» совместно с независимыми экспертами)

**Узнать больше о мероприятии и пройти регистрацию  
Вы можете на сайте [www.skladcom.ru](http://www.skladcom.ru)  
или, позвонив по тел.(495) 223-34-24.**

**Профессионально.**

**Никакой теории, только практика!**