

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРВИСНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ АРХИТЕКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Излагаются сведения о процессно-ориентированных информационных системах, которые представляют основу для построения сервисно-ориентированной архитектуры предприятия (СОА). Выделяются основные принципы СОА, показывается, почему сети Петри используются для моделирования этих систем, и описываются расширения сетей Петри, используемые для моделирования различных аспектов сервисно-ориентированных систем.

Ключевые слова: сервисно-ориентированная архитектура, веб-сервис, сети Петри, BPM, workflow.

В настоящее время одной из основных концепций построения распределенных информационных систем различных областей применения считается сервис-ориентированный подход. Для проектирования и моделирования подобного рода систем разработаны различные подходы, нотации и стандарты, в том числе с помощью аппарата сетей Петри. Цель статьи состоит в том, чтобы показать преимущества сетей Петри как инструмента моделирования сервис-ориентированных систем, а также провести обзор существующих расширений этого аппарата, разработанных специально для анализа тех или иных аспектов сервисного взаимодействия.

В основе этой концепции, как и в основе сервис-ориентированного программирования, лежит понятие сервиса или службы – самостоятельной программной единицы с четко определенным интерфейсом, который обеспечивает слабую привязку программы к внешней среде. Так, сервис обладает способностью к повторному использованию, что вкупе с отсутствием сохранения состояния позволяет применять его многократно в различных контекстах.

Сервис лег в основу концепции сервис-ориентированной архитектуры (СОА) информационных систем, новой парадигмы проектирования, построения и поддержки информационной инфраструктуры современного предприятия. Однако, по оценкам специалистов (например, в [1–6]), внедрение как СОА, так и отдельных технологических решений, связанных с этой архитектурой, влечет целый ряд проблем и рисков, частично нивелировать которые можно еще на стадии проектирования и планирования будущей системы. Решение этих задач не только для сервис-ориентированных, но и вообще информационных систем неотрывно связано с аспектами их моделирования [7–9]. Так, в российской и зарубежной литературе выделяют подробную классификацию моделей и технологий моделирования (например, в [10–12]), однако на практике для моделирования предметной области, структуры, содержания и поведения информационной системы используют достаточно небольшой перечень общеизвестных и общепринятых техник, таких как SADT (IDEF), DFD, ARIS, UML, BPMN, EPC ([1; 4; 13–15]). Все перечисленные подходы, являясь, по сути, простыми графическими нотациями, позволяют строить прикладные модели системы, удобные для непосредственного восприятия человеком и командной работы, но не позволяющие проводить тщательные исследования модели, например, имитационное моделирование с использованием вычислительной техни-

ки. Так, в [16] отмечается существующее разделение всех методик моделирования в области информационных систем на две группы: группу «академических» языков моделирования, способных строить формальное описание системы, и группу «бизнес»-техник, которые были перечислены нами ранее. Между тем существует формализм, способный описывать поведение сложных систем и обладающий преимуществами как достаточно простого графического отображения, так и серьезной математической обоснованности, используемый как в практике проектирования информационных систем ([1; 9; 17; 18]), так и широко применяемый в разработке различных теоретических аспектов их функционирования – сети Петри. Несмотря на то, что эту методологию относят, в первую очередь, к «академическим» языкам, существуют подходы к отображению различных «бизнес»-моделей к моделям на языке сетей Петри и наоборот (например, в [16; 19; 20; 21; 22]). Широкое развитие прикладных моделей и высокоуровневых сетей Петри целей разработки ПО и информационных систем позволяют предположить перспективность применения этой методологии к изучению сервис-ориентированных систем.

Последние два десятилетия основной тренд разработки экономических информационных систем, как и идеология менеджмента, ориентируется на так называемый «процессный» подход в управлении, связанный с построением модели организации, ориентированной на выполнение бизнес-процессов. Как отмечается в [19], в 1970-х и 1980-х гг. при построении информационных систем доминировали подходы, ориентированные на управление данными, когда концепция хранения и обработки информации являлась ключевой, а бизнес-процессы адаптировались к внедряемым технологиям. Появление методологий управления, связанных с выделением бизнес-процессов, привело к развитию иного подхода: процессно-ориентированных информационных систем. Процессно-ориентированная информационная система (ПОИС) – это класс информационных систем, в основе задач которых лежит исполнение и управление бизнес-процессами с привлечением людей, других приложений и информационных ресурсов на основе процессных моделей [23]. На сегодня к ПОИС относят системы уровня WFMS, BPM, КИС, СЭД и др. Первыми процессно-ориентированными системами стали системы управления рабочими потоками (Workflow Management System, WFMS). В начале 1990-х гг. был создан международный консорциум Workflow Management Coalition, который определил, что workflow (дословно «рабочий поток») – это «полная или частичная автоматизация бизнес-процесса, где документы, информация и задачи для действия над ними передаются от одного участника к другому в соответствии с определенным набором правил» [24], а WFMS – это система, которая описывает, создает и управляет исполнением рабочих потоков с помощью специализированного программного обеспечения, которая может взаимодействовать с участниками процесса и, если потребуется, вызывать ИТ-инструменты и приложения для выполнения определенных задач [24]. Развитие систем WFMS привело к появлению на рынке BPM-систем (Business Process Management, управление бизнес-процессами). BPMS (BPM-системы, BPM-system) представляют собой расширение и развитие WFMS и решают более широкий круг задач, фокусируясь не только на автоматизации бизнес-процессов, поддерживая различные формы анализа, мониторинга и перепроектирования бизнес-процессов [25–29].

Разработка или внедрение СОА требует решения целого ряда технологических и организационных задач, среди которых выделяется задача поддержки бизнес-процессов, и, как отмечается, например, в [26], [29], BPMS и WFMS стали естественным выбором для решения этой проблемы. BPM, выделяя бизнес-процессы и взаимосвязи между ними, обеспечивает необходимый контекст для внедрения служб, а СОА обеспечивает реализацию и поддержку сервисов. Исторически в основе технической реализации сервиса в СОА лежало понятие веб-службы. Веб-служба – это сервис, взаимодействие с которым осуществляется посредством широкого спектра протоколов сети Интернет. В отличие от обычного сервиса, к которому отсутствуют технологические требования (т. е. он может реализовываться с помощью различных техник, как общедоступных, так и закрытого характера), для веб-служб в течение нескольких лет объединенным консорциумом таких компаний, как Oracle, Microsoft, IBM, SUN и др., были разработаны стандарты и протоколы, обеспечивающие возможность полноценного взаимодействия в среде веб-сервисов.

В [17; 21; 22; 31–35] приводятся следующие аргументы, позволяющие считать сети Петри подходящим средством моделирования информационных и производственных систем, систем класса workflow и сервис-ориентированных приложений:

- возможность представления в модели в естественном виде параллельных процессов, их синхронизацию, причинно-следственную связь событий, проблемы распределения ресурсов, конкуренцию за них и т. д.
- локализация состояния и действий, позволяющая моделировать системы как «сверху-вниз», так и наоборот, т. е. последовательно уточнять модель системы, разбивать ее на подсистемы, повторно использовать ранее рассмотренные компоненты и проч.;
- интерпретируемость модели предполагает возможность ассоциировать модель с широким кругом различных значений и связей с моделируемыми объектами внешнего мира. Различные варианты интерпретации необходимы для решения различных целей модели – верификации, оценки производительности, планирования и проч.;
- графическое представление модели, облегчающее документирование и мониторинг системы, а также обмен информацией о системе между заинтересованными лицами. С помощью сетей Петри возможно передавать сложные требования и спецификации к системе вместо использования неоднозначных текстовых описаний или математических нотаций, сложных для понимания заказчиком. Вместе с наличием компьютерных средств моделирования это делает графическую симуляцию в сетях Петри удобной и предоставляет разработчикам ИС мощное средство для поддержки процессов разработки сложных систем;
- формальная и точная семантика моделей позволяет проводить строгий анализ, автоматизированную реализацию или генерирование кода для контроля или имитации поведения системы. Как математический инструмент, модели на сетях Петри могут быть описаны набором линейных алгебраических равенств или другими математическими моделями, описывающими поведение системы. Это позволяет проводить формальную проверку свойств, связанных с поведением системы, например, параллельных операций, синхронизации, отсутствия тупиков, взаимных исключений и распределения ресурсов;
- широкая поддержка научного и инженерного сообщества предполагает доступ к большому количеству техник анализа моделей, независимость от конкретного разработчика или поставщика, а также высокий уровень надежности разработанных методик и техник. Например, показано, что сети Петри могут моделировать все основные конструкции, которые используются для описания бизнес-процессов в WfMS.

Ввиду определенной сложности и многогранности понятия сервис-ориентированной архитектуры, которое даже в официальной литературе или имеет до 10 трактовок (например, [5]), или книги, посвященные СОА, вообще не дают прямых определений (например, [1–3; 5; 10]), или официальные стандарты¹ определяют СОА как «парадигму организации и использования распределенных возможностей», где под парадигмой понимается целый комплекс идеологий в области современных информационных технологий, теоретических научных исследований в области «сервис-ориентированной архитектуры» как таковой не проводится. Однако практически все сопутствующие понятия, раскрывающие парадигму СОА, подвергаются тщательному изучению, моделированию и развитию, в том числе и с помощью сетей Петри. В первую очередь, к этим понятиям относятся сервисы [35–37]², веб-сервисы [12], различные аспекты их взаимодействия [38–45], технологии моделирования СОА [15], теория управления системами со множеством параллельных процессов [42–46], теория управления бизнес-процессами и workflow [16; 19; 23; 34; 47; 48], оркестровка и хореография в сложных системах [49]³. Таким образом, можно выделить ряд основных направлений использования сетей Петри и их расширений в этих исследованиях.

¹ Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0. URL: <https://www.oasis-open.org/committees/download.php/19679/> (дата обращения 10.09.2012).

² Ввиду большого объема литературы, посвященной исследованию различных аспектов СОА, здесь приводятся только примеры исследований, тесно связанных с сетями Петри.

³ Отметим, что из обзора намеренно исключены аспекты исследований, относящиеся в первую очередь не только к СОА, например, различные аспекты работы с БД, теория передачи данных, теория многоагентных систем и проч.

Сети типа «позиция / переход» (Position / Transition nets, PN-сети), или «классические» сети Петри. Они графически представляются в виде двудольного ориентированного мультиграфа [50]. Сеть Петри представляет собой совокупность позиций и переходов, т. е. граф обладает двумя типами узлов. Узлы соединены направленными дугами. Соединение между двумя узлами одного типа не допускается. Каждой позиции можно назначить фишку, которая может перемещаться из одной позиции в другую при запуске переходов между позициями. Распределение фишек по позициям называется маркировкой сети. Классические сети используются при изучении проблем, связанных с аспектами взаимодействия элементов системы, таких как, например, синхронизация и асинхронное выполнение, параллельные операции и возникающие при этом конфликтные состояния.

Workflow-сети (Workflow-nets, WF-сети). Сеть Петри называется WF-сетью [33], если она имеет отдельную позицию старта, отдельную позицию завершения, а все узлы лежат на некотором пути от старта к финишу. Фишка на позиции старта указывает на новый экземпляр процесса, тогда как фишка на позиции завершения определяет завершение процесса. Все переходы в WF-сети должны содействовать в продвижении некоторого процесса от начального состояния к завершению. Workflow-сети были разработаны специально для моделирования workflow-процессов. Например, свойство устойчивости workflow-сети позволяет гарантировать, что процесс будет успешно завершён из любой достижимой маркировки, что, в свою очередь, гарантирует успешное выполнение моделируемого бизнес-процесса.

Восстанавливающие сети (Reset nets, R-сети). Восстанавливающие сети Петри дополняют классическую модель весами дуг и восстанавливающими дугами, которые позволяют удалить все фишки из позиции во время запуска такого перехода. Восстанавливающие сети являются достаточно узкоспециализированным расширением и используются, например, для поддержки в модели системы отмены выполнения процесса на любой из его стадий.

Высокоуровневые сети Петри (High Level Petri Nets, HLP-сети) и их подвид: окрашенные сети Петри (Coloured Petri Nets, CP-сети). Строить модели реальных объектов с помощью классических сетей, как отмечается в [30], достаточно сложно в связи с их «низкоуровневостью». Моделирование масштабных структур с помощью сетей Петри было бы невозможно без концепций и удобства обозначения высокоуровневых моделей. Окрашенные сети Петри, являясь самыми популярными представителями высокоуровневых сетей, вводят фишки различных «цветов» и возможность иерархического разбиения модели, позволяя, таким образом, моделировать потоки передачи разнородной информации между позициями сети и строить более сложные схемы взаимодействия элементов системы, описывать сложные системы, начиная от распределённых баз данных и коммуникационных сетей до сетевых протоколов и гибких производственных систем.

Открытые (сервисные) сети (Open nets, service nets, O-сети). Это расширение сетей Петри было разработано специально для моделирования взаимодействующих систем по моделям компонентно- и сервисно-ориентированного программирования. В основе коммуникационной способности компонента и сервиса лежит понятие интерфейса, поэтому открытые сети расширяют классические через определение набора интерфейсных позиций. Размещение фишек на входных или выходных интерфейсных позициях означает начало работы или окончание работы сервиса. Как и в случае с workflow-сетями, для определения границ ответственности и применимости сервиса к сервисным сетям добавляется множество финальных маркировок, достижение которых означает завершение работы сервиса. Асинхронная природа взаимодействия сервисов добавляет сложности при описании каналов сообщений системы в виде дуг и переходов, однако для решения этой проблемы были разработаны специальные механизмы разъединения каналов или обобщения данных.

Таким образом, можно сделать вывод, что описанные расширения сетей Петри позволяют описывать моделируемую систему с точки зрения ее различных аспектов взаимодействия. Например, WF-сети, существенно ограничивая модель требованием однонаправленности и поточности, тем самым же дают возможность строить схему бизнес-процесса в классическом его определении – как совокупности работ, преобразующих входные ресурсы в выходной продукт. При этом WF-сети могут быть расширены восстанавливающими сетями [48], что позволит моделировать с помощью них режим отмены выполнения процесса, но фишки этих сетей смогут описывать только передачу управления или переход единственного, неизменно-

го ресурса. Такое ограничение обходится с помощью окрашенных сетей, на которые, в частности, можно наложить те же требования, что и на WF-сети, усложнив, таким образом, модель бизнес-процесса и приблизив ее к особенностям реального мира. В другой плоскости понимания СОА лежит сервис – независимый элемент, выполняющий ограниченный набор работ, но способный к асинхронному взаимодействию с другими сервисами. Внутреннюю реализацию сервиса, как процесса преобразования входов в выходы, можно легко описать с помощью WF- или CP-сетей, однако его коммуникационные особенности представляется возможным показать только открытыми сетями.

Подводя итоги, можно сказать, что не существует формализма, позволяющего описывать в целом СОА. Это связано со сложностью и многогранностью понятия концепции, куда различные исследователи включают различные составляющие, и, являясь наиболее подходящим инструментом для подобного моделирования, сети Петри и их расширения способны воспроизводить только ограниченный набор свойств СОА и тех составляющих, что явно выделяются в рамках этой парадигмы.

Список литературы

1. *Rosen M. et al.* Applied SOA: Service-Oriented Architecture and Design Strategies. Wiley Publishing, 2008. 699 p.
2. *Bieberstein N. et al.* Executing SOA: A Practical Guide for the Service-Oriented Architect. IBM Press, 2008. 240 p.
3. *Cohen F.* Fast SOA. Morgan Kaufmann, 2006. 279 p.
4. *Brown P. C.* Implementing SOA: Total Architecture in Practice. Addison Wesley Professional, 2008. 736 p.
5. Компас в мире сервис-ориентированной архитектуры (SOA) / Н. Биберштейн, С. Боуз, М. Фиаммант, К. Джонс, Р. Ша. М.: Кудиц-пресс, 2007. 256 с.
6. *Erl Th.* Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design. Prentice Hall, 2005. 792 p.
7. *Вендров А. М.* Проектирование программного обеспечения экономических информационных систем. М.: Финансы и статистика, 2006. 544 с.
8. *Грекул В. И., Денищенко Г. Н., Коровкина Н. Л.* Проектирование информационных систем. М.: ИНТУИТ, 2005. 304 с.
9. *Мишенин А. И.* Теория экономических информационных систем. М.: Финансы и статистика, 2002. 240 с.
10. *Bell M.* Service-Oriented Modeling Service Analysis Design and Architecture. John Wiley & Sons Ltd, 2008. 366 p.
11. *Уткин В. Б., Балдин К. В.* Информационные системы в экономике. М.: Академия, 2004. 288 с.
12. *Bassam Zafar.* Conceptual Modelling of Adaptive Web Services based on High-level Petri Nets: PhD Thesis. 2008. URL: <https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/2407/thesis44.pdf?sequence=1>
13. *Stojanovic Z.* Service-Oriented Software System Engineering. Idea Group, 2005. 413 p.
14. *Семакин И. Г., Хеннер Е. К.* Информационные системы и модели. М.: Бином, 2005. 303 с.
15. *Артамонов И. В.* Современные стандарты описания и исполнения бизнес-процессов // Применение математических методов и информационных технологий в экономике. 2010. С. 5–31.
16. *Lohmann N., Verbeek E., Dijkman R.* Petri Net Transformations for Business Processes – A Survey // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. 2009. P. 46–63.
17. *Graham Ia.* Requirements Modelling and Specification for Service Oriented Architecture. John Wiley & Sons Ltd, 2008. 301 p.
18. *Hruz B., Zhou M. C.* Modeling and Control of Discrete-event Dynamic Systems. Springer, 2007. 341 p.

19. *Aalst W. M. P. van der*. Business Process Management Demystified: A Tutorial on Models, Systems and Standards for Workflow Management // Lectures on Concurrency and Petri Nets. 2004. P. 1–65.
20. *Campos J., Merseguer J.* On the Integration of UML and Petri Nets in Software Development // Petri Nets and Other Models of Concurrency. 2006. P. 19–36.
21. *Denaro G., Pezze M.* Petri Nets and Software Engineering // Lectures on Concurrency and Petri Nets. 2004. P. 39–67.
22. *Zurawski R., Meng Chu Zhou.* Petri Nets and Industrial Applications: A Tutorial // IEEE. Transactions on industrial electronic. 1994. Vol. 41. P. 567–583.
23. *Aalst W. M. P. van der.* Process-Aware Information Systems: Lessons to Be Learned from Process Mining // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. 2009. P. 1–26.
24. *Lawrence P.* Workflow Handbook // Workflow Management Coalition. N. Y.: John Wiley and Sons, 1997.
25. *Chang J.* BPMS: Strategy and Implementation. Auerbach Publications, 2005. 286 p.
26. Орлик С. Концепция SOA – технология, архитектура или нечто большее? URL: <http://www.connect.ru/article.asp?id=8781> (дата обращения 10.09.2012).
27. *Белайчук А.* Зачет по BPM // Открытые системы. 2006. № 1. С. 62–65.
28. *Дубова Н.* Платформы управления бизнес-процессами // Открытые системы. 2005. № 10. С. 30–36.
29. *Catts A., Clair J. St.* BPM Enabled by SOA. 2009. 98 p. URL: <http://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp4495.pdf>
30. *Jensen K.* An Introduction to the Theoretical Aspects of Coloured Petri Nets. 1994. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.72.7477>
31. *Smith E.* Principles of High-Level net Theory // Lectures on Petri Nets: Basic Models. 1998. P. 174–210.
32. *Silva M., Teruel E., Valette R., Pingaud H.* Petri Nets and Production Systems // Lectures on Petri Nets: Applications. 1998. P. 85–124.
33. *Aalst W. M. P. van der.* The Application of Petri Nets to Workflow Management. 1998. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.37.8232>.
34. *Aalst W. M. P. van der.* 3 good reasons for using a petri-net-based workflow managment system. 1996. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.147.3781&rep=rep1&type=pdf>
35. *Massuthe P.* Operating Guidelines for Services: Dissertation. Univ. Press Facilities, Eindhoven, 2009. 266 p.
36. *Wolf K.* Does My Service Have Partners? // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. 2009. P. 152–171.
37. *Corina P., Soto C., Jose M. L.* A Petri Net-based Approach to Incremental Modelling of Flow and Resources in Service-Oriented Manufacturing Systems. 2010. URL: http://peer.ccsd.cnrs.fr/docs/00/71/54/97/PDF/PEER_stage2_10.1080%252F00207543.2011.561371.pdf
38. *Bernardi S., Bobbio An., Donatelli S.* Petri Nets and Dependability // Lectures on Concurrency and Petri Nets. 2004. P. 125–179.
39. *Kohler M., Rolke H.* Web Service Orchestration with Super-Dual Object Nets // Petri Nets and Other Models of Concurrency. 2007. P. 263–280.
40. *Men P., Duan Z., Yu B.* Utilizing Fuzzy Petri Net for Choreography Based Semantic Web Services Discovery // Petri Nets and Other Models of Concurrency. 2007. P. 362–380.
41. *Hartonas Ch.* A Combined Open Petri Net and Process Algebraic approach to Message-Passing Services. 2007. URL: http://www.academia.edu/354616/A_Combined_Open_Petri_Net_and_Process_Algebraic_Approach_to_Message-Passing_Services (дата обращения 01.05.2012).
42. *Jensen K.* Coloured Petri Nets modeling and validation of concurrent systems. Springer, 2009. 384 p.
43. *Bruni R., Melgratti H., Montanari U.* Extending the Zero-Safe Approach to Coloured, Re-configurable and Dynamic Nets // Lectures on Concurrency and Petri Nets. 2004. P. 291–327.
44. *Recalde L., Silva M., Ezpeleta J., Teruel E.* Petri Nets and Manufacturing Systems: An Examples-Driven Tour // Lectures on Concurrency and Petri Nets. 2004. P. 742–789.
45. *Baver Acu, Wolfgang Reisig.* Compensation in Workflow Nets // Petri Nets and Other Models of Concurrency. 2006. P. 65–83.

46. Kindler E. Model-Based Software Engineering and Process-Aware Information Systems // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. P. 27–46.
47. Reichert M., Rinderle-Ma S., Dadam P. Flexibility in Process-Aware Information Systems // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II. 2009. P. 115–135.
48. Aalst W. M. P. van der et al. Soundness of Workflow Nets with Reset Arcs // Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency III. 2009. P. 50–70.
49. Артамонов И. В. Оркестровка и хореография: подходы к описанию композитных бизнес-процессов // Применение математических методов и информационных технологий в экономике. 2011. № 10. С. 5–31.
50. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 p.

Материал поступил в редколлегию 14.11.2012

I. V. Artamonov

MODELING SERVICE-ORIENTED ARCHITECTURE USING PETRI NETS – AN OVERVIEW

The paper describes process-aware information systems as a foundation for enterprise's service-oriented architecture (SOA), shows major concepts of SOA, explains why Petri nets is used for modeling such systems and describes extensions of Petri nets, which are used for modeling of SOA aspects.

Keywords: service-oriented architecture, web-service, Petri nets, BPM, workflow.

References

1. Rosen M. et al. Applied SOA: Service-Oriented Architecture and Design Strategies. Wiley Publishing, 2008, 699 p.
2. Bieberstein N. et al. Executing SOA: A Practical Guide for the Service-Oriented Architect. IBM Press, 2008, 240 p.
3. Fast SOA / F. Cohen. Morgan Kaufmann, 2006, 279 p.
4. Brown P. C. Implementing SOA: Total Architecture in Practice. Addison Wesley Professional, 2008, 736 p.
5. Biebershtein N., Bose S., Fimmante M., Jones K., Shah R. Service-oriented architecture (SOA) compass. IBM Press, 2007, 256 p.
6. Service-Oriented Architecture: Concepts, Technology, and Design / Th. Erl. Prentice Hall, 2005, 792 p.
7. Vendrov A. M. Proektirovanie programmnoy obespecheniya jekonomicheskikh informacionnyh sistem. [Software design for economic information systems]. / Finances and Statistics, 2006, 544 p.
8. Grekul V. I. Design of information systems. Moscow, Intuit, 2005, 304 p.
9. Mishenin A. I. Proektirovanie informacionnyh sistem [Theory of economic information systems]. Moscow, Finances and Statistics, 2002, 240 p.
10. Bell M. Service-Oriented Modeling Service Analysis Design and Architecture. John Wiley & Sons Ltd, 2008, 3366 p.
11. Utkin V. B., Baldin K. V. Informacionnye sistemy v jekonomike [Information systems in economy]. Moscow, Academia Publ., 2004, 288 p.
12. Bassam Zafar. Conceptual Modelling of Adaptive Web Services based on High-level Petri Nets: PhDThesis. URL: <https://www.dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/2407/thesis44.pdf?sequence=1>
13. Stojanovic Z. Service-Oriented Software System Engineering. Idea Group, 2005, 413 p.

14. Semakin I. G., Khenner E. K. Informacionnye sistemy i modeli [Information systems and models]. Moscow, Binom, 2005, 303 p.
15. Artamonov I. V. Sovremennyye standarty opisaniya i ispolneniya biznes-processov [Modern standards of business processes description and execution]. *An application of mathematical methods and information technologies in science, education and economy*, 2010, p. 5–31.
16. Lohmann N., Verbeek E., Dijkman R. Petri Net Transformations for Business Processes – A Survey. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*, 2009, p. 46–63.
17. Graham I. Requirements Modelling and Specification for Service Oriented Architecture. John Wiley & Sons Ltd, 2008, 301 p.
18. Hruz B., Zhou M. C. Modeling and Control of Discrete-event Dynamic Systems. Springer, 2007, 341 p.
19. Aalst W. M. P. van der. Business Process Management Demystified: A Tutorial on Models, Systems and Standards for Workflow Management. *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, 2004, p. 1–65.
20. Campos J., Merseguer J. On the Integration of UML and Petri Nets in Software Development. *Petri Nets and Other Models of Concurrency*, 2006, p. 19–36.
21. Denaro G., Pezze M. Petri Nets and Software Engineering. *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, 2004, p. 439–467.
22. Zurawski R., Meng Chu Zhou. Petri Nets and Industrial Applications: A Tutorial. *IEEE Transactions on industrial electronic*, 1994, vol. 41, p. 567–583.
23. Aalst W. M. P. van der. Process-Aware Information Systems: Lessons to Be Learned from Process Mining. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*. 2009, p. 1–26.
24. Lawrence P. Workflow Handbook. *Workflow Management Coalition*. N. Y., John Wiley and Sons, 1997.
25. Chang J. BPMS: Strategy and Implementation. Auerbach Publications, 2005, 286 p.
26. Orlic C. SOA – a technology, architecture or something more? 2008. URL: [http://www. connect.ru/article.asp?id=8781](http://www.connect.ru/article.asp?id=8781)
27. Belaichuk A. Zachet po BPM. [Test in BPM]. *Open Systems*, 2006, no. 1.
28. Dubova N. Platformy upravleniya biznes-processami [Platforms for business processes management]. *Open Systems*, 2005, no. 10.
29. Catts A., Clair J. St. BPM Enabled by SOA. 2009. URL: <http://www.redbooks.ibm.com/redpapers/pdfs/redp4495.pdf>
30. Jensen K. An Introduction to the Theoretical Aspects of Coloured Petri Nets. 1994. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.72.7477>
31. Smith E. Principles of High-Level net Theory. *Lectures on Petri Nets: Basic Models*, 1998, p. 174–210.
32. Silva M., Teruel E., Valette R., Pingaud H. Petri nets and Production Systems. *Lectures on Petri Nets: Applications*, 1998, p. 85–124.
33. Aalst W. M. P. van der. The Application of Petri Nets to Workflow Management, 1998. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.37.8232>.
34. Aalst W. M. P. van der. 3 good reasons for using a petri-net-based workflow management system, 1996. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.147.3781&rep=rep1&type=pdf>
35. Massuthe P. Operating Guidelines for Services: Dissertation. Univ. Press Facilities, Eindhoven, 2009, 266 p.
36. Wolf K. Does My Service Have Partners? *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*, 2009, p. 152–171.
37. Corina P., Soto C., Jose M. L. A Petri Net-based Approach to Incremental Modelling of Flow and Resources in Service-Oriented Manufacturing Systems. URL: http://peer.ccsd.cnrs.fr/docs/00/71/54/97/PDF/PEER_stage2_10.1080%252F00207543.2011.561371.pdf
38. Bernardi S., Bobbio A., Donatelli S. Petri Nets and Dependability. *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, 2004, p. 125–179.
39. Kohler M., Rolke H. Web Service Orchestration with Super-Dual Object Nets. *Petri Nets and Other Models of Concurrency*, 2007, p. 263–280.
40. Men P., Duan Z., Yu B. Utilizing Fuzzy Petri Net for Choreography Based Semantic Web Services Discovery. *Petri Nets and Other Models of Concurrency*, 2007, p. 362–380.

41. Chrysafis Hartonas. A Combined Open Petri Net and Process Algebraic approach to Message-Passing Services. URL: http://www.academia.edu/354616/A_Combined_Open_Petri_Net_and_Process_Algebraic_Approach_to_Message-Passing_Services
42. Jensen K. Coloured Petri Nets modeling and validation of concurrent systems. Springer, 2009, 384 p.
43. Bruni R., Melgratti H., Montanari U. Extending the Zero-Safe Approach to Coloured, Reconfigurable and Dynamic Nets. *Lectures on Concurrency and Petri Nets*, 2004, p. 291–327.
44. Recalde L., Silva M., Ezpeleta J., Teruel E. Petri Nets and Manufacturing Systems: An Examples-Driven Tour. *Lectures on Concurrency and Petri Net*, 2004, p. 742–789.
45. Bayer Acu, Wolfgang Reisig Compensation in Workflow Nets. *Petri Nets and Other Models of Concurrency*, 2006, p. 65–83.
46. Kindler E. Model-Based Software Engineering and Process-Aware Information Systems. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*, 2009, P. 27–46.
47. Reichert M., Rinderle-Ma S., Dadam P. Flexibility in Process-Aware Information Systems. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency II*, 2009, p. 115–135.
48. Aalst W. M. P. van der et al. Soundness of Workflow Nets with Reset Arcs. *Transactions on Petri Nets and Other Models of Concurrency III*, 2009, P. 50–70.
49. Artamonov I. V. Orkestrovka i horeografiya: podhody k opisaniyu kompozitnyh biznes-processov [Orchestration and choreography: approaches for business processes description]. *An application of mathematical methods and information technologies in science, education and economy*, 2011, no. 10, p. 5–31.
50. Peterson J. L. Petri net theory and the modeling of systems. Moscow, Mir, 1984, 264 p.