

---

УДК 004.41/.42

DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-1-176-185

## ОСНОВАННОЕ НА CPN-TOOLS ПО ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

### CPN-BASED SIMULATION SOFTWARE FOR BUSINESS PROCESS THROUGHPUT ANALYSIS

**И.В. Артамонов**

**I.V. Artamonov**

Байкальский государственный университет,  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11

Baikal State University, 11 Lenina St, Irkutsk, 664003, Russia

E-mail: ivan.v.artamonov@gmail.com

#### **Аннотация**

При разработке и внедрении корпоративных информационных технологий необходимо оценивать эффективность работы проектируемых и совершенствуемых бизнес-процессов. Разрабатываемая система показателей во многом зависит от специфики бизнес-процесса, а ее качество – от опыта эксперта. Существующие технологии не позволяют объективно оценивать работоспособность будущих процессов по их схемам, будучи либо слишком примитивными, либо сложными для применения к моделям реального предприятия. Метрики производительности вообще сложно поддаются изучению формальными методами, так как кроме структуры процесса необходимо учитывать временные аспекты его работы, которые вообще могут носить стохастический характер. В статье описывается программное обеспечение для анализа производительности бизнес-процесса путем имитационного моделирования. Для отображения схемы взаимодействия предлагается использовать аппарат цветных сетей Петри со специальным расширением для анализа временных меток. Управление имитационным комплексом осуществляется серверным программным обеспечением через веб-ориентированный интерфейс. Программный комплекс позволяет проводить анализ нескольким исследователям одновременно.

#### **Abstract**

It's necessary to measure business process throughput during development and implementation of corporate information systems. A system of throughput metrics for such analysis is determined by business process nature, while its quality depends on analyst experience. Current technologies do not provide a method for objective measuring of future business processes throughput efficiency being either too primitive or too complex for real-world enterprise models. Throughput metrics are generally difficult to study with formal methods, since in addition to the structure of the process, it is necessary to take into account time aspects, which can be stochastic in general. The paper presents simulation software for analysis of business process throughput. The program uses Timed Coloured Petri Nets for representing an interaction scheme, CPN Tools for simulation and is ruled by an application server through web-oriented interface. On the whole the simulation package is designed for using in distributed environment and allows carrying out an analysis by several researchers concurrently.

**Ключевые слова:** бизнес-процесс, имитационное моделирование, пропускная способность, производительность, CPN Tools, цветные сети Петри.

**Keywords:** business process, computer simulation, throughput, performance, CPN Tools, Coloured Petri Net.

---

## Введение

Процессное управление в менеджменте предполагает переход от управления отдельными подразделениями компании к управлению сквозными бизнес-процессами, проходящими через все предприятие и даже выходящими за его границы. Поэтому в основе процессного подхода лежит деятельность по описанию, моделированию и исполнению бизнес-процессов. Под бизнес-процессом (процессом) будем понимать совокупность взаимосвязанных процедур и действий, совместно достигающих определенной бизнес-цели [Workflow Management Coalition, 1999]. В текущей рыночной ситуации хорошим конкурентным преимуществом является использование автоматизированных технологий в различных сферах деятельности. Работа многих современных информационных систем (ИС) предприятия основывается на модели бизнес-процессов. Поэтому деятельность по формализации и улучшению бизнес-процессов является важной для внедрения информационных технологий и успешной работы предприятия.

Создание процессной модели предприятия сопровождается построением и анализом моделей бизнес-процессов. Эта стадия предваряет внедрение ИС, а выполняется она графическим образом. Однако этап анализа и усовершенствования построенных моделей процессов во многом остается неформальным, зависящим от знаний и опыта аналитика [Грибанова, Шуплецов, 2017]. Аналитик занимается выявлением неэффективного использования ресурсов, избыточных или ненужных взаимодействий, сокращением цепочек передачи данных и пр.

Не менее важно в процессе анализа ответить на вопросы «Как долго может длиться процесс?», «Сколько он стоит?», «Сколько ресурсов может понадобиться?» и т. д. Достоверные ответы, полученные объективными методами, снижают зависимость от компетенции эксперта и позволяют эффективно повышать качество работы бизнеса. Сегодня существуют технологии, позволяющие получать такие ответы от уже выполняющихся процессов и корпоративных информационных систем, например, с помощью глубинного анализа процессов [Aalst, 2011]. Но предсказание эффективности будущей системы пока остается практически нерешенной проблемой. Эксперты-аналитики обычно владеют данными о статистике выполнения и эффективности уже существующих операций, механизмов и человеческих ресурсов, но не могут с достаточной точностью рассчитывать показатели нового, только создаваемого процесса. Особенно, если этот процесс сложный, трудноформализуемый, включает ручные операции, а его поведение носит вероятностный характер. Поэтому в индустрии часто анализ производительности таких процессов не производится, так, в [Dumke et al., 2001] говорится, что производительность автоматизированных систем анализируется только на последних этапах разработки, когда уже нет возможности вносить кардинальные изменения.

Технологии функционально-стоимостного анализа, встроенные в средства моделирования процессов, отвечают на некоторые вопросы, но расчеты проводятся достаточно просто: например, для каждого блока схемы записываются данные (время или стоимость), а в случае последовательного расположения блоков сумма их данных и определяется как итоговая для всего процесса. Понятно, что такой метод становится бесполезным в случаях усложнения структуры, например, с добавлением условий или циклов, не учитывает нагрузку на процесс и разное время его выполнения, зависящее от множества факторов. И получается, что ввод данных о процессах в систему моделирования носит формальный, справочный характер, а их анализ проводится только экспертно.

Анализ существующих формальных, объективных способов расчета производительности бизнес-процессов показал, что большая часть из них опирается на методики, сложность применения которых часто экспоненциально растет при росте сложности исследуемой системы.

А такие нужные операции, как поиск наиболее производительных конфигураций бизнес-процесса, анализ ее чувствительности к эффективности работы отдельных операций вообще не проводится.

Описываемый в статье программный комплекс лишен перечисленных недостатков. Он опирается на ту же предпосылку (имеются данные о производительности операций, составляющих процесс), что и большинство из существующих на данный момент времени формальных методов предварительного расчета производительности, однако позволяет получить разносторонние результаты быстрее и легче, используя метод имитационного моделирования.

### Анализ существующих методов

Несмотря на то, что вопросы оценки производительности бизнес-процессов исследуются параллельно с развитием процессного подхода, нами не было обнаружено хоть сколько-нибудь выделенного определения этого термина (отметим, что к этому понятию мы не относим такие классические экономические термины, как производительность земли, капитала, труда [Соколова, 2003; Радостева, 2018] и пр., где время не рассматривается как основная ось измерений, а смысл терминов близок к «продуктивности»). Будем считать, что производительность бизнес-процесса – это набор показателей, оценивающих эффективность выполнения бизнес-процесса с учетом временных ограничений.

Показатели производительности (throughput indicators) являются частью более широкой группы показателей эффективности (performance indicators), куда кроме собственно «времени» в [Heckl, Moorman, 2010] относят качество, стоимость и гибкость. Эти показатели хорошо согласуются с существующими системами оценки эффективности компаний (в KPI, Performance prism, BSC [Балашова, Репина, 2011] и пр.) и являются важной частью метрик качества бизнес-процесса [Cardoso 2002]. Также производительность можно отнести к группе показателей надежности бизнес-процесса.

Ввиду слабого развития вычислительной техники большинство работ по теории построения производственных систем ([Al-Jaar et al, 1988.; Al-Jaar et al, 1990; Leonides, 1991; Zuberek, Kubiak, 1994.; D'Souzaa, Khator, 1994; Moore, Gupta, 1996; Viswanadham, Srinivasa, 2000; Kasi, Tang, 2005; Chryssolouris, 2005; Heinrich, 2013]) или теории QoS бизнес-процессов ([Aguilar et al., 1999; Cardoso, 2002; Hosftede, 2005; Alkhalidi et al., 2008; Brocke, Rosemann, 2010; Saeedi et al., 2010]) ориентируются на формальные методы анализа. В сервис-ориентированной построения систем и предприятий идеологии, развивающейся последние годы, технологической основой выполнения бизнес-процессов или рабочих потоков являются композиции сервисов, поэтому был проведен анализ и методов расчета их производительности. В общем методике анализа производительности делятся на 2 направления: с использованием имитационного или математического моделирования. Во втором случае методике ориентируются на анализ структуры системы ([Lemos, et al., 2005; Myoung Ko et al., 2008; Anja Strunk, 2010), как минимум предполагают расчет с учетом только последовательного расположения под-процессов, в более сложных случаях предлагая различные алгоритмы расчета производительности по базовым алгоритмическим конструкциям (циклов, развилок и пр.).

Но любой из описанных методов труден для реального применения и его сложность часто экспоненциально растет с ростом сложности исследуемых систем (проблема комбинаторного взрыва). Небольшая часть работ использует имитационное моделирование как доказательство эффективности частных алгоритмов ([Silver et al., 2003.; Sato et al., 2007; Yang et al., 2008]). Имитационное моделирование хорошо применимо для анализа работы процессов и систем, однако практическое применение метода ограничено ввиду недостатка универсальных технологий и средств. Хорошо формализуемые цепочки автоматизированных бизнес-процессов можно моделировать достаточно точно, но бизнес-процессы, включающие большие объемы ручного труда и неконтролируемых факторов – сложно [Aalst, 2015].

Кроме того, подготовка имитационного эксперимента для такого рода систем может занимать время, сравнимое с разработкой прототипа среды выполнения бизнес-процессов,

который, кстати, и может являться имитационной моделью. Типовые инструменты имитационного моделирования требуют длительного освоения и позволяют моделировать простейшие сигналы, обрабатываемые системой. Таким образом, дороговизна и методическая сложность затрудняют точные расчеты производительности бизнес-процессов в задачах автоматизации бизнеса.

### Описание программного комплекса

Мы предлагаем новый способ анализа производительности бизнес-процессов, легкий в освоении и интерпретации результатов. Методика предполагает использование специального программного комплекса (ПКБТ), который дополнительно может применяться для оценки надежности работы различных систем и процессов [Артамонов, 2014].

В качестве языка моделирования процессов используется аппарат сетей Петри, но в целях расширения возможностей моделирования используются цветные сети Петри – они позволяют задавать множество данных и их типов, а каждая операция процесса – это отдельный переход сети. Простые сети Петри, давая хорошие возможности к структурному и поведенческому анализу, не позволяют анализировать производительность схемы, так как не предполагают наличия временных характеристик для позиций, переходов и меток. Поэтому нами предлагаются к использованию цветные сети Петри с временным расширением, данным в [Jensen, 2009]. Обоснование возможности использования цветных сетей Петри для целей моделирования бизнес-процессов было нами дано в [Артамонов, 2013] и др. работах.

ПКБТ уже был способен анализировать надежность бизнес-процессов, но новые функции расширяют функциональность для оценки производительности и решают следующие задачи:

1. Оценка производительности процесса целиком. В модель вводятся значения производительности отдельных операций, скорость работы исполнителей, интенсивность входящего потока заявок.

2. Оценка чувствительности. Анализ основан на предположении, что производительность одних подпроцессов больше влияет на общую производительность, чем других. Анализ чувствительности определяет величину этого влияния и проводит сравнение влияний разных операций друг на друга.

3. Сравнение производительности различных структур процесса. ПКБТ проводит исследование для разных значений начальных параметров или для разных структур для нахождения оптимальной схемы процесса.

ПКБТ может проводить оценку производительности системы любой структуры, если есть данные о производительности входящих в состав процесса операций. Как уже отмечалось, подобное исследование можно провести, используя существующие методики, но для структур, содержащих большое количество элементов с нелинейными связями, сложность использования любых аналитических методов непропорционально возрастает, а их точность снижается.

В основе работы ПКБТ лежит специальный алгоритм оценки производительности процесса, который был нами подробно описан в [Артамонов, 2014]:

1. Анализ структуры процесса и выявление его операций.

2. Построение схемы процесса в терминах цветных сетей Петри в ПО CPN Tools (определение наборов цветов, позиций и переходов, входных данных, описание переменных и функций). Важнейшей и отличительной задачей этого этапа является определение на схеме временных меток данных и скорости работы операций (рис. 1).

3. Создание нового эксперимента в ПКБТ: загрузка файла с моделью процесса, определение количества внутренних запусков, приблизительного количества срабатываний переходов до завершения имитации, задание типа задачи оценки производительности.

4. Проведение имитационного эксперимента.

5. Анализ результатов.

Если за один имитационный прогон цели оценки не достигаются, то в модель процесса вносятся изменения и все этапы повторяются. Предполагается, что верификация модели проводится экспертом в процессе ее разработки.

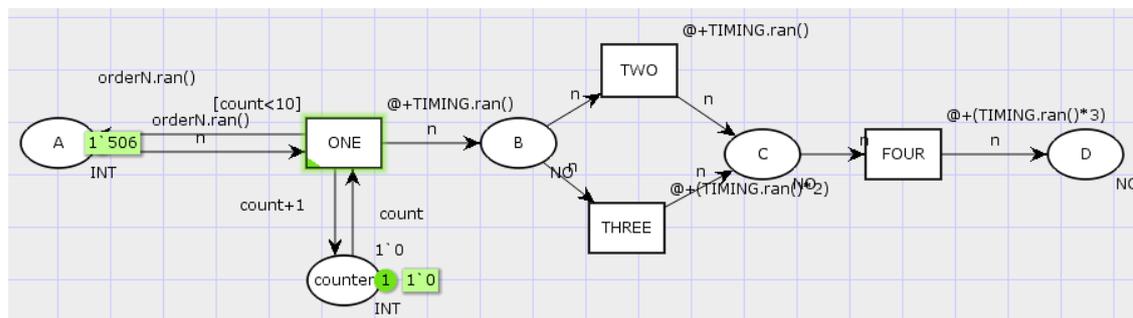


Рис. 1. Модель процесса

Fig.1. Process model

В качестве индикаторов производительности используются показатели, представленные в [Артамонов, 2018]. Структура ПКБТ описана в [Артамонов, 2014].

Результатом работы ПКБТ является аналитическая справка, описывающая уровень производительности процесса.

Рассмотрим примеры результатов эксперимента над простой моделью процесса, представленной на рис. 1. Схема обработки ресурсов линейна, за исключением двух подпроцессов TWO и THREE, которые принимают ресурсы из B и передают результаты работы в C, имитируя таким образом два параллельных агрегата или работника. Для упрощения схемы время задержки каждой операции выбирается случайным образом.

Вывод результатов о производительности в целом отображается в виде таблицы. На рис. 2 показано, как выглядит отчет по времени выполнения процесса в некоторых условных единицах. Под условной единицей времени может пониматься любой временной промежуток, который нужен исследователю. Например, видно, что медианное значение времени выполнения процесса – 238 условных единиц.

Вторая часть общей справки описывает загруженность отдельных операций. Метрика загруженности, превышающая 1, сигнализирует о том, что под-процесс не справляется с возложенной на него работой и создает эффект «бутылочного горлышка». Дополнительно дается информация о количестве операций, которое выполнил каждый под-процесс в процессе эксперимента.

#### Время работы процесса целиком

Среднее время	Наиболее вероятное	Минимальное	Максимальное
235.34	238.5	127	294

#### Загруженность переходов

Переход	Эффективность	Загруженность	Мин. кол. операций	Макс. кол. операций
ONE	0.50	0.33	10	10
TWO	0.21	0.17	2	2
THREE	0.19	0.16	1	1
FOUR	0.50	0.33	10	10

Рис. 2. Результаты анализа бизнес-процесса в целом

Fig.2. General results of a business process analysis

А итоги оценки производительности по отдельным операциям представляются в виде информации по ее переходу сети Петри и относящимся к ним позициям (рис. 2). Фактор пропускной способности показывает, как долго входящие ресурсы ожидали обработки, а время данных в позициях показывает насколько долго заявки находились в

системе до прибытия на позицию. Например, можно увидеть, что заявка доходит до подпроцесса D в среднем за 278 условных единиц времени.

Загруженность операций процесса легко отследить визуально с помощью специальных графиков (рис. 4).

**Пропускная способность позиций (время ожидания обработки)**

Позиция	Среднее время	Минимальное время	Максимальное время
A	216.10	105	278
B	46.34	1	99
C	71.59	1	186
D	103.59	1	236
counter	216.10	105	278

**Время данных в позициях (по данным в метках)**

Позиция	Среднее время	Минимальное время	Максимальное время
B	70.42	10	100
C	156.09	29	294
D	277.63	94	568

Рис. 3. Таблица показателей производительности отдельных операций  
 Fig. 3. Throughput indicators of particular operations

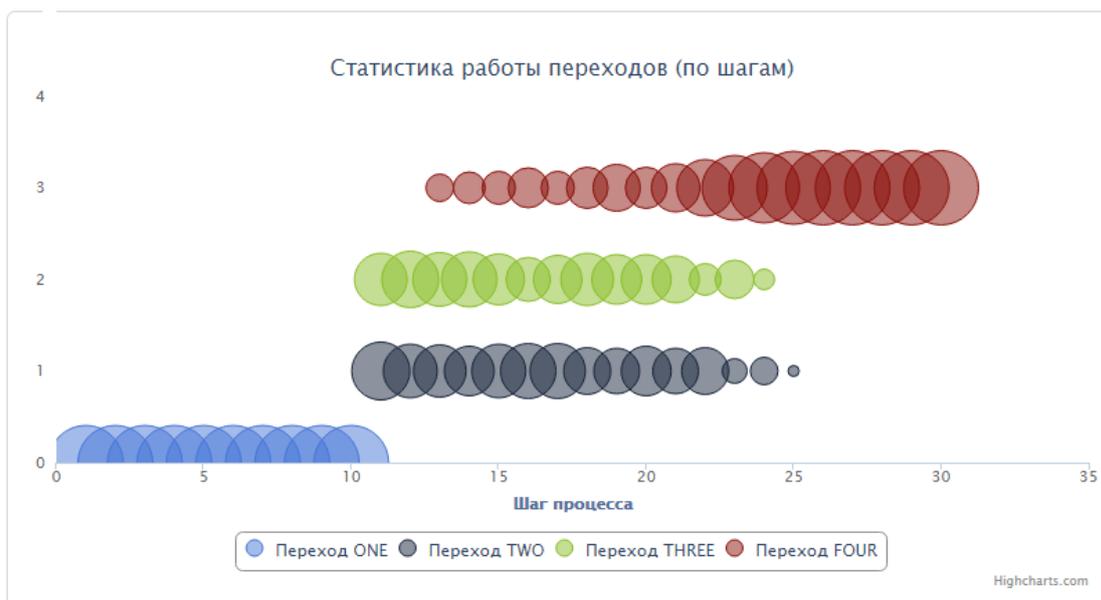


Рис. 4. Визуализация загруженности операций процесса  
 Fig. 4. Operations workload visualization

**Заключение**

Основные преимущества ПКБТ как системы анализа производительности бизнес-процессов перед распространенными средствами имитационного моделирования широкого профиля описаны нами в [Артамонов, 2014] и являются:

1. Работа с моделями бизнес-процессов. Цветные сети Петри позволяют строить схемы бизнес-процессов любой сложности, добавляя к ним временные метки, стохастические параметры, условные выражения, циклы т.е., в общем говоря, любую необходимую алгоритмическую логику.

2. Работа со сложными наборами данных. Обычно средства имитационного моделирования общего профиля оперируют только с простыми числовыми сигналами, и только небольшая часть подобных программ поддерживает эксперименты для нескольких

простых сигналов параллельно. А ПКБТ реализует возможности цветных сетей Петри и ПО CPN Tools, которые могут оперировать сложными наборами данных («цветами»).

3. Сложность модели ограничена только задачами исследователя. ПО CPN Tools, которое используется в качестве ядра симуляции, кроме собственно работы со схемой процесса, позволяет определять в модели точки вызова любых других программ, то есть, например, во время имитации вызывать микросервисы или функции из API существующих на предприятии ИС. Так можно привлекать в исследование производительности даже людей, тестируя ручные операции, человеческий фактор и таким образом обходя ограничение, описанное в [Aalst, 2015].

Единственный недостаток ПКБТ является продолжением его достоинств: исследователь должен владеть инструментом графического моделирования CPN Tools и знать особенности цветных сетей Петри. Однако их изучение для, например, разработчиков бизнес-процессов может быть легче и проще, чем изучение и применение сложных формальных методов анализа производительности.

### Список литературы

1. Артамонов И.В. 2013. Использование окрашенных сетей Петри для моделирования бизнес-транзакций в сервис-ориентированной среде. Известия Иркутской государственной экономической академии (БГУЭП), 5: 25–25.
2. Артамонов И.В. 2014. Программный комплекс анализа надежности бизнес-транзакции. Информационные системы и технологии, 5 (85): 5–13.
3. Артамонов И.В. 2018. Показатели производительности бизнес-процесса. Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика, 1: 43–50.
4. Балашова Н.В., Репина П.В. 2011. Опыт внедрения сбалансированной системы показателей. Baikal Research Journal, 6: 45.
5. Грибанова Н.Н., Шуплецов А.Ф. 2017. Особенности планирования и прогнозирования компаний на основе информационных моделей. Baikal Research Journal, 8 (3): 8–16.
6. Радостева М.В. 2018. К вопросу о производительности труда. Научные ведомости БелГУ, Серия Экономика. Информатика, 2 (45): 268–272.
7. Соколова Л.Г. 2003. Генезис категории «Производительность». Известия Байкальского государственного университета, 3 (36): 52–55.
8. Aalst W.M.P. van der. 2011. Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes. Springer, 2011, 352.
9. Aalst W.M.P. van der. 2015. Business Process Simulation Survival Guide. Jan vom Brocke, Michael Rosemann. Handbook on Business Process Management. Berlin, Springer-Verlag: 337–370.
10. Aguilar M., Rautert T., Pater A. 1999. Business process simulation: a fundamental step supporting process centered management. Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: 1383–1392.
11. Al-Jaar R., Desrochers A. 1990. Performance evaluation of automated manufacturing systems using generalized stochastic Petri. International Conference on Complex Systems and Applications, 6: 621–639.
12. Al-Jaar R., Desrochers A., DiCesar F. 1988. Evaluation of part-type mix for a machining workstation using generalized stochastic Petri nets. Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control, Austin, 2307–2313.
13. Alkhalidi F., Olaimat M., Rashed A. 2008. The Role of Simulation in Business Process Reengineering. Asim El Seikh, Abid Al Ajeeli, Evon M. Abu-Taieh. Simulation and Modeling. IGI Publishing: 359–390.
14. Brocke J. vom, Rosemann M. 2010. Handbook on Business Process Management 2. Springer, 616.
15. Cardoso J. 2002. Quality of Service and Semantic Composition of Workflows. Athens, 216.
16. Chrystolouris G. 2005. Manufacturing Systems: Theory and Practice. Springer, 606.
17. D'Souza K., Khator S. 1994. A survey of Petri net applications in modeling controls for automated manufacturing systems. Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference, 4: 5–16.

18. Dumke R., Rautenstrauch C., Schmietendorf A., Scholz A. 2001. Aspects of Performance Engineering – An Overview. *Performance Engineering: State of the Art and Current Trends*. Magdeburg, 8–16.
19. Heckl D., Moorman J. 2010. *Process Performance Management*. Jan vom Brocke, Michael Rosemann. *Handbook on business process management 2: Strategic alignment, governance, people and culture*. Springer: 115–135.
20. Heinrich R. 2013. *Aligning business process quality and information system quality*. Heidelberg, Heidelberg University: 254.
21. Hofstede A. ter, Dumas M., Aalst W.M.P. van der. 2005. *Process-Aware Information Systems: bridging people and software through process technology*. John Wiley & Sons, Inc, 409.
22. Jensen K. 2009. *Coloured Petri Nets modeling and validation of concurrent systems*. Springer, 384.
23. Kasi V., Tang X. 2005. *Design Attributes and Performance Outcomes: A Framework for Comparing Business Processes*. In (SAIS Eds.): *In Proceedings of the 10th Southern Association for Information Systems*, 226–232.
24. Lemos R. de, Gacek C., Romanovsky A. 2005. *Architecture-Based Reliability Prediction for Service-Oriented Computing*. Vincenzo Grassi. *Architecting Dependable Systems III*. Berlin, Springer: 279–299.
25. Leonides C.T. 1991. *Manufacturing and Automation Systems: Techniques and Technologies: Advances in Theory and Applications*. Academic Press, 446.
26. Moore K.E., Gupta S.M. 1996. *Petri net models of flexible and automated manufacturing systems: a survey*. *International Journal of Production Research*, 34 (11): 3001–3035.
27. Myoung Ko J., Kim C. O., Kwon I 2008. *Quality-of-service oriented web service composition algorithm and planning architecture*. *Journal of Systems and Software*, 81 (11): 2079–2090.
28. N. Sato, S. Trivedi. 2007. *Stochastic Modeling of Composite Web Services for Closed-Form Analysis of Their Performance and Reliability Bottlenecks*. *Service-Oriented Computing – ICSOC*: 107–118.
29. Saeedi K., Zhao L., Falcone P. 2010. *Extending BPMN for Supporting Customer-Facing Service Quality Requirements*. 2010 IEEE International Conference on Web Services (ICWS): 616–623.
30. Silver G.A., Maduko A., Rabia J., Amit S., Miller J. A. 2003. *Modeling and Simulation of Quality of Service for Composite Web Services*. 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics, and Informatics: 420–425.
31. Strunk A. 2010. *An Algorithm to Predict the QoS-Reliability of Service Compositions*. 6<sup>th</sup> World Congress on Services (SERVICES-1): 205–212.
32. Viswanadham N., Srinivasa N.R.. 2000. *Performance analysis and design of supply chains: a Petri net approach*. *Journal of the Operational Research Society*, 51 (10): 1158–1169.
33. *Workflow Management Coalition*. 1999. *Workflow Management Coalition Terminology & Glossary*. Issue 3.0, 65.
34. Yang L., Yu D., Zhang B. 2008. *Reliability Oriented QoS Driven Composite Service Selection Based on Performance Prediction*. The 20-th International Conference on Software Engineering & Knowledge Engineering: 215–218.
35. Zuberek W.M., Kubiak W. 1994. *Throughput analysis of manufacturing cells using timed Petri nets*. *Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 1328–1333.

## References

1. Artamonov I.V. 2013. *Using Coloured Petri Nets to model business transactions in a service-oriented environment*. *Bulletin of Baikal State University*, 5: 25–25. (in Russian).
2. Artamonov I.V. 2014. *A software package for the analysis of business transactions' reliability*. *Information Systems and Technologies*, 5 (85): 5–13. (in Russian).
3. Artamonov I.V. 2018. *Business Process Throughput Metrics*. *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Economics*, 1: 43–50. (in Russian).
4. Balashova N.V., Repina P.V. 2011. *Introduction of balanced scorecard*. *Baikal Research Journal*, 6: 45. (in Russian).
5. Gribanova N.N., Shupletsov A.F. 2017. *Features of corporate planning and forecasting on the basis of information models*. *Baikal Research Journal*, 8 (3): 8–16. (in Russian).



6. Radosteva M.V. 2018. On the question of labor productivity. *Belgorod State University Scientific Bulletin, Economics. Computer Science*, 2 (45): 268–272. (in Russian).
7. Sokolova L.G. 2003. Genesis of "Productivity" category. *Bulletin of Baikal State University*, 3 (36): 52–55. (in Russian).
8. Aalst W.M.P. van der. 2011. *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Springer, 2011, 352.
9. Aalst W.M.P. van der. 2015. *Business Process Simulation Survival Guide*. Jan vom Brocke, Michael Rosemann. *Handbook on Business Process Management*. Berlin, Springer-Verlag: 337–370.
10. Aguilar M., Rautert T., Pater A. 1999. Business process simulation: a fundamental step supporting process centered management. *Proceedings of the 31st conference on Winter simulation: 1383–1392*.
11. Al-Jaar R., Desrochers A. 1990. Performance evaluation of automated manufacturing systems using generalized stochastic Petri. *International Conference on Complex Systems and Applications*, 6: 621–639.
12. Al-Jaar R., Desrochers A., DiCesar F. 1988. Evaluation of part-type mix for a machining workstation using generalized stochastic Petri nets. *Proceedings of the 27th IEEE Conference on Decision and Control*, Austin, 2307–2313.
13. Alkhaldi F., Olaimat M., Rashed A. 2008. The Role of Simulation in Business Process Reengineering. Asim El Seikh, Abid Al Ajeeli, Evon M. Abu-Taieh. *Simulation and Modeling*. IGI Publishing: 359–390.
14. Brocke J. vom, Rosemann M. 2010. *Handbook on Business Process Management 2*. Springer, 616.
15. Cardoso J. 2002. *Quality of Service and Semantic Composition of Workflows*. Athens, 216.
16. Chryssolouris G. 2005. *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. Springer, 606.
17. D'Souza K., Khator S. 1994. A survey of Petri net applications in modeling controls for automated manufacturing systems. *Systems, Man, and Cybernetics, 2000 IEEE International Conference*, 4: 5–16.
18. Dumke R., Rautenstrauch C., Schmietendorf A., Scholz A. 2001. Aspects of Performance Engineering – An Overview. *Performance Engineering: State of the Art and Current Trends*. Magdeburg, 8–16.
19. Heckl D., Moorman J. 2010. *Process Performance Management*. Jan vom Brocke, Michael Rosemann. *Handbook on business process management 2: Strategic alignment, governance, people and culture*. Springer: 115–135.
20. Heinrich R. 2013. *Aligning business process quality and information system quality*. Heidelberg, Heidelberg University: 254.
21. Hosftede A. ter, Dumas M., Aalst W.M.P. van der. 2005. *Process-Aware Information Systems: bridging people and software through process technology*. John Wiley & Sons, Inc, 409.
22. Jensen K. 2009. *Coloured Petri Nets modeling and validation of concurrent systems*. Springer, 384.
23. Kasi V., Tang X. 2005. Design Attributes and Performance Outcomes: A Framework for Comparing Business Processes. In (SAIS Eds.): *In Proceedings of the 10th Southern Association for Information Systems*, 226–232.
24. Lemos R. de, Gacek C., Romanovsky A. 2005. *Architecture-Based Reliability Prediction for Service-Oriented Computing*. Vincenzo Grassi. *Architecting Dependable Systems III*. Berlin, Springer: 279–299.
25. Leonides C. T. 1991. *Manufacturing and Automation Systems: Techniques and Technologies: Advances in Theory and Applications*. Academic Press, 446.
26. Moore K.E., Gupta S.M. 1996. Petri net models of flexible and automated manufacturing systems: a survey. *International Journal of Production Research*, 34 (11): 3001–3035.
27. Myoung Ko J., Kim C. O., Kwon I. 2008. Quality-of-service oriented web service composition algorithm and planning architecture. *Journal of Systems and Software*, 81 (11): 2079–2090.
28. N. Sato, S. Trivedi. 2007. Stochastic Modeling of Composite Web Services for Closed-Form Analysis of Their Performance and Reliability Bottlenecks. *Service-Oriented Computing – ICSOC*: 107–118.
29. Saeedi K., Zhao L., Falcone P. 2010. Extending BPMN for Supporting Customer-Facing Service Quality Requirements. *2010 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*: 616–623.

30. Silver G. A., Maduko A., Rabia J., Amit S., Miller J. A. 2003. Modeling and Simulation of Quality of Service for Composite Web Services. 7th World Multiconference on Systemics, Cybernetics, and Informatics: 420–425.
31. Strunk A. 2010. An Algorithm to Predict the QoS-Reliability of Service Compositions. 6th World Congress on Services (SERVICES-1): 205–212.
32. Viswanadham N., Srinivasa N.R.. 2000. Performance analysis and design of supply chains: a Petri net approach. Journal of the Operational Research Society, 51 (10): 1158–1169.
33. Workflow Management Coalition. 1999. Workflow Management Coalition Terminology & Glossary. Issue 3.0, 65.
34. Yang L., Yu D., Zhang B. 2008. Reliability Oriented QoS Driven Composite Service Selection Based on Performance Prediction. The 20-th International Conference on Software Engineering & Knowledge Engineering: 215–218.
35. Zuberek W.M., Kubiak W. 1994. Throughput analysis of manufacturing cells using timed Petri nets. Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1328–1333.

**Ссылка для цитирования статьи**  
**For citation**

Артамонов И.В. 2020. Основанное на CPN-Tools ПО для анализа производительности бизнес-процессов. Экономика. Информатика. 47 (1): 176–185. DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-1-176-185

Artamonov I.V. 2020. CPN-based simulation software for business process throughput analysis. Economics. Information technologies. 47 (1): 176–185 (in Russian). DOI 10.18413/2687-0932-2020-47-1-176-185