

На правах рукописи



**Артамонов Иван Васильевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ БИЗНЕС-ТРАНЗАКЦИЙ  
В СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СРЕДЕ**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (региональные народнохозяйственные комплексы)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2015

Работа выполнена на кафедре «Информатика и кибернетика»  
ФГБОУ ВПО «Байкальский государственный университет экономики и права»

- Научный руководитель: доктор экономических наук, профессор  
**Амбросов Николай Владимирович**
- Официальные оппоненты: **Николайчук Ольга Анатольевна**,  
доктор технических наук, доцент, ФГБУН  
«Институт динамики систем и теории управления  
им. В.М. Матросова» СО РАН (г. Иркутск),  
старший научный сотрудник  
**Доррер Михаил Георгиевич**,  
кандидат технических наук,  
ФГБОУ ВО «Вятский государственный универ-  
ситет» (г. Киров), и.о. декана факультета  
автоматики и вычислительной техники
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследо-  
вательский технический университет»

Защита состоится 17 ноября 2015 г. в 15.00 часов на заседании диссертационно-го совета Д 212.070.07 при ФГБОУ ВПО «Байкальский государственный университет экономики и права» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, д. 24, корп. 9, зал заседаний ученого совета БГУЭП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВПО «Байкальский государственный университет экономики и права» по адресу 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУЭП, корпус 2, аудитория 101, ([www.isea.ru](http://www.isea.ru)).

Отзывы на автореферат присылать по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, д. 11, БГУЭП, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан «\_\_\_» сентября 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Т.И. Ведерникова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В современном мире возрастает роль и значимость взаимодействий на основе информационных технологий. Организация согласованной производственной деятельности в сфере экономики с помощью соответствующих программно-технических средств стала необходимым условием успеха в бизнесе. Несколько предприятий могут одновременно реализовывать общий бизнес-процесс, который пересекает границы организаций, области ответственности и может длиться долгое время. Выполнение таких процессов обеспечивается распределенными системами и множеством участников. Современные способы интеграции приложений, например, сервис-ориентированная концепция, позволяют создавать сложные распределенные системы малозатратно и с высокой скоростью, что приводит к росту объема выполняемых системами операций и увеличению их роли на предприятии. Простота технической реализации не требует от разработчиков тщательного планирования и проектирования создаваемых компонентов, при этом отсутствуют алгоритмы и методы обеспечения требуемого уровня стабильности их взаимодействия, а это негативно сказывается на надежности выполнения бизнес-процессов в целом. Кроме того, выполнение таких бизнес-процессов часто требует ручного труда, сложной логики выполнения, использования необратимых операций и привлечения разнородных систем и участников. Поэтому использование существующих аналитических методов расчета надежности может быть недостаточным, так как они зачастую предназначены для анализа систем однотипных компонентов, связанных в несложные структуры. Таким образом, актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки методики анализа надежности и программного обеспечения, которые позволят исследовать надежность бизнес-транзакций, поддерживаемыми распределенными сервис-ориентированными программными системами.

Исследования взаимодействия компонентов, объединенных в бизнес-транзакцию, начали развиваться с 2000-х гг. в работах M. Little и M. P. Papazoglou. В диссертации применяются теория надежности технических систем, транзакций в системах управления базами данных, теория процессного управления, а также используются результаты по теории длительных транзакций и экономических операций, надежности и моделированию бизнес-процессов и сервис-ориентированных систем, изложенные в работах W.M.P. van der Aalst, J. Mendling, M. Dumas, A.H.M. ter Hofstede, H. A. Reijers, M. Reichert, K. Jensen, M. Little, P. Massuthe, M. La Rosa, A.J.M.M. Weijters, J. Cardoso, H. Smith, P. Fingar, A. Rozinat, N. Russell и др.

**Целью работы** является разработка методики и программного обеспечения для анализа надежности бизнес-транзакций в сервис-ориентированной среде.

Достижение указанной цели связано с решением комплекса следующих **задач**:

- систематизировать информацию о современном состоянии технологий, методов построения и анализа надежности распределенных процессно-ориентированных систем;
- описать неделимую последовательность операций распределенного взаимодействия как самостоятельный объект, определить его свойства, типы и принципы построения;
- выявить показатели надежности распределенного взаимодействия и разработать методику ее анализа с точки зрения системного подхода;

- разработать инструмент моделирования взаимодействия объектов распределенной среды, который учитывает его сложную природу и поддерживает описание сервис-ориентированных технологий построения систем;
- разработать программное обеспечение, позволяющее осуществлять анализ надежности распределенного взаимодействия, и провести его апробацию на примере проектируемого взаимодействия разнородных систем;

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались методы системного анализа, методы теории множеств, окрашенных сетей Петри, цепей Маркова и теории надежности, методы математического и имитационного моделирования, объектно-ориентированного, сервис-ориентированного моделирования систем.

**Объектом исследования** является распределенная информационная система, включающая разнородные компоненты, построенная с использованием сервис-ориентированных технологий и обеспечивающая выполнение бизнес-процессов предприятия(-й).

**Предметом исследования** является анализ надежности взаимодействия объектов распределенной сервис-ориентированной программной среды, которые совместно обеспечивают выполнение бизнес-процессы предприятия(-й).

**Научную новизну** составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

- предложена система показателей надежности бизнес-транзакции, выявленных путем описания ее тройственной природы: как неделимого действия, композиции взаимодействующих систем и бизнес-процесса;
- разработан инструмент моделирования бизнес-транзакций на базе окрашенных сетей Петри, учитывающий их сложную природу и современные подходы к построению сервис-ориентированных систем;
- предложен алгоритм анализа устойчивости бизнес-транзакции на основе цепей Маркова;
- разработана методика и программное обеспечение анализа надежности бизнес-транзакции на основе имитационного моделирования и предложенных показателей надежности;

**Практическая и теоретическая значимость** работы заключается в том, что:

- выделена бизнес-транзакция как семантически неделимая последовательность операций системы для анализа надежности распределенной сервис-ориентированной программной системы;
- обосновано представление бизнес-транзакции как сложной разнородной системы, имеющей тройственную природу, что позволяет интегрировать подходы к оценке надежности из разных прикладных областей;
- разработан инструмент моделирования распределенных сервис-ориентированных систем на базе окрашенных сетей Петри;
- предложен алгоритм обнаружения тупиковых ситуаций и бесконечных циклов на основе представления модели бизнес-транзакции в виде цепи Маркова;
- предложены показатели надежности бизнес-транзакции, которые учитывают ее сложную природу и поведение;
- создано алгоритмическое обеспечение и программный комплекс, которые позволяют проводить анализ надежности бизнес-транзакций;
- результаты работы используются:

- 1) на предприятии «ООО Группа компаний Инвест38» в задачах проектирования распределенных программных систем, моделирования сложных бизнес-процессов и оценки надежности взаимодействия со сторонними организациями;
- 2) используются в учебном процессе по дисциплинам «Разработка распределенных систем», «Распределенные системы обработки информации», «Интернет-программирование» по специальностям «Прикладная информатика (в экономике)» и «Бизнес-информатика» ФГБОУ ВПО БГУЭП.

**Апробация работы.** Теоретические и практические результаты были представлены на международном симпозиуме «Надежность и качество» в г. Пенза, 2013; на III международной практической конференции «Innovative Information Technologies» в г. Прага (Чехия), 2014; на 11-й международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» в г. Сочи, 2014; на международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании «Инфотех-2013» в г. Севастополь, 2013; на II международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии» в г. Прага (Чехия), 2013; на 10-й международной научно-практической конференции «Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий» в г. Сочи, 2013; а также на ежегодных научных конференциях аспирантов кафедры Информатики и Кибернетики БГУЭП с 2009 по 2013 г. и научных семинарах преподавателей кафедры Информатики и Кибернетики БГУЭП в 2010 и 2013 гг.

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 19 печатных работ, из них 9 в журналах, рекомендованных ВАК, получено 1 свидетельство Роспатента об официальной регистрации программы для ЭВМ на программный комплекс для анализа надежности, разработано 1 учебное пособие.

**Структура работы и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 244 наименований и двух приложений. Общий объем работы составляет 216 страниц, из которых 182 страницы основного текста, включает 50 рисунков и 25 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, описывается степень ее научной разработанности, приводится список смежных научных областей и затрагиваемых вопросов, определяются цель и задачи исследования, приводятся результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, описывается теоретическая и практическая значимость, приводится информация об апробации работы, публикациях и описывается структура диссертации.

В **первой главе** рассмотрено понятие бизнес-процесса, процессного подхода к управлению организацией и понятие процессно-ориентированной информационной системы. Дано определение распределенной программной системы. Показано, что сервис-ориентированная архитектура является современным подходом к интеграции корпоративных систем.

Бизнес-транзакция определяется как согласованное изменение состояния двух и более сторон взаимодействия (бизнес-процесса), где каждая сторона готова к такому изменению и знает, что его согласованно примут все стороны. На практике под биз-

нес-транзакцией часто можно понимать неделимую последовательность операций взаимодействующих систем, выполняющих совместный бизнес-процесс.

Определены свойства бизнес-транзакции и показаны ее отличия от системных «простых» транзакций. Предложено рассматривать бизнес-транзакцию как систему. Описана ее структура, связи, элементы. Предложены этапы системного исследования ее в целом и ее надежности. Описаны особенности применения методики системного анализа к исследованию бизнес-транзакций. Приведены этапы анализа ее надежности с точки зрения системного подхода.

Ввиду того, что бизнес-транзакция часто представляет собой сложную систему, функционирующую в распределенной среде с привлечением различных ресурсов, то для анализа ее стандартные методы теории надежности технических или программных систем могут быть недостаточными. Показано, что основные работы по обеспечению надежности должны проводиться на этапе проектирования системы. Предложено для оценки разрабатываемой бизнес-транзакции воспользоваться методом имитационного моделирования. Описаны преимущества этого метода по сравнению с аналитическими подходами. Предложен набор задач в области бизнес-транзакций, решение которых можно достичь методом имитационного моделирования.

Во **второй главе** предложено рассматривать бизнес-транзакцию в сервис-ориентированной программной среде как систему с тройственной природой: как неделимой операции, композиции сервисов и бизнес-процесс, обладающий целью, потребляемыми ресурсами, свойствами необратимости, свойством стоимости и времени выполнения.

Описан разработанный инструмент моделирования бизнес-транзакций в сервис-ориентированной среде, алгоритм определения устойчивости бизнес-транзакции и даны формулы расчета показателей надежности бизнес-транзакции. Показана разработанная методика анализа надежности.

Описан разработанный специальный программный комплекс, автоматизирующий предложенную методику, процесс имитационного моделирования и расчета показателей надежности (далее ПКБТ).

В **третьей главе** рассмотрено решение практической задачи проектирования бизнес-транзакции с заданной надежностью с помощью программного комплекса и предложенной методики. Исследовалась надежность сложной бизнес-транзакции интернет-магазина.

1. Был проведен системный анализ предметной области и бизнес-процесса, лежащего в основе бизнес-транзакции. Собраны статистические данные по надежности отдельных операций. Схема процесса отображена в виде набора схем IDEF0 и UML.
2. Определено, что бизнес-процесс вовлекает 8 участников в 5 независимых средах и 24 операции, где 11 операций влияют на внутреннюю надежность. Тип: транзакция бизнес-процессов. Управление: смешанное, преимущественно оркестровка.
3. В анализируемой бизнес-транзакции участвуют несколько программных систем независимых участников, клиенты и сотрудники компании. Управление надежностью возможно, но только для ресурсов, лежащих в зоне ответственности владельца интернет-магазина, то есть должна рассматриваться внутренняя надежность бизнес-транзакции.

4. Связанность участников: различная, к 14 операциям применимо восстановление. В силу свойств процесса возможна компенсация на разных его этапах.
5. Поставлена задача безотказной и безаварийной работы 90% выполняемых бизнес-транзакций при условии одновременного выполнения до 50 бизнес-транзакций.
6. Построенная модель бизнес-транзакции на базе окрашенных сетей Петри включает 24 операции и 41 позицию.
7. В силу ограниченных ресурсов анализ надежности по структуре бизнес-транзакции не проводился.
8. Выполнение каждого экземпляра бизнес-транзакций потребовало не менее 500 переходов сети Петри.
9. Для всех операций введены подготовленные данные, характеризующие их надежность. Вероятность безотказной работы, например, колеблется от 0.77 до 0.99.
10. Полный анализ потребовал выполнения ~500 тыс. имитационных прогонов, ~ 742 млн. шагов переходов.
11. После каждого эксперимента ПКБТ рассчитывал все показатели надежности бизнес-транзакции, с помощью вычислительных библиотек проводилась статистическая оценка результатов и проверка гипотез о наличии влияния отдельных операций на надежность в целом (см. рис. 1).

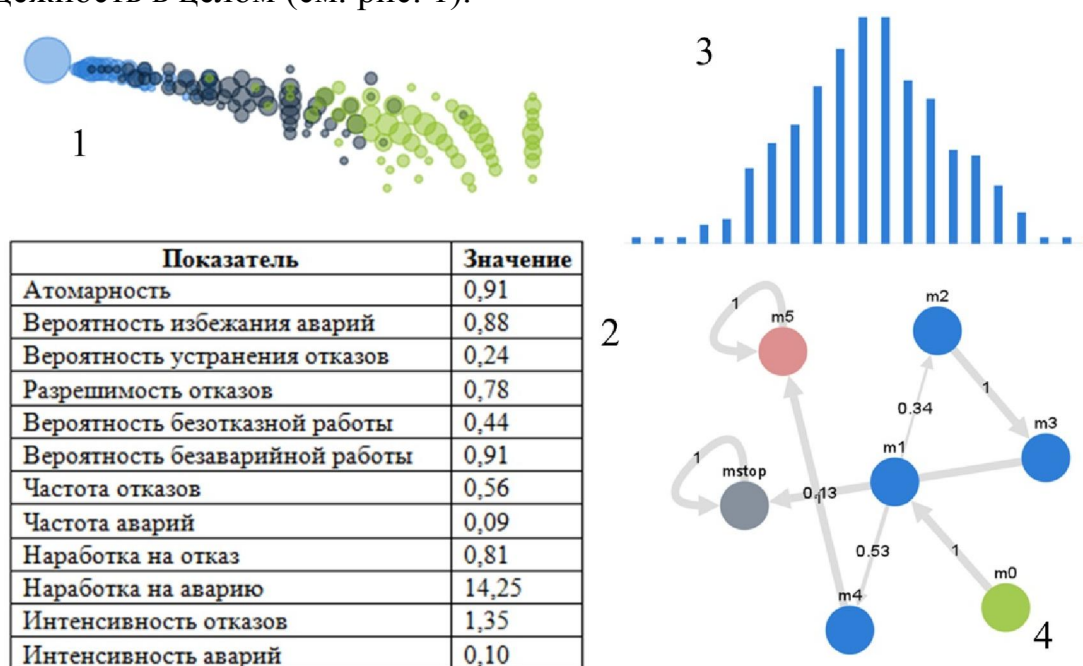


Рис. 1. Примеры различных отчетов, формируемых ПКБТ

По итогам анализа разработанная модель бизнес-транзакции была признана устойчивой. Эксперименты с последовательным вводом компенсирующих и восстанавливающих сетей для ненадежных операций показали, что для достижения целевых показателей надежности необходимо увеличить количество операторов, обслуживающих бизнес-транзакцию, в 3 раза и провести дублирование всех сервисов компании, находящихся на сервере провайдера.

В **заключении** описаны основные результаты работы: формализовано понятие бизнес-транзакции; определены ее свойства, типы и архитектурные шаблоны; предложено рассматривать бизнес-транзакцию в сервис-ориентированной среде как сложную систему, обладающую тройственной природой; разработана система показателей надежности бизнес-транзакции; разработан инструмент моделирования биз-

нес-транзакций в сервис-ориентированной среде на базе окрашенных сетей Петри; создана модель бизнес-транзакции с помощью представленного инструмента; разработан алгоритм обнаружения тупиковых ситуаций и бесконечных циклов на основе представления модели бизнес-транзакции в виде цепи Маркова; предложена методика анализа надежности бизнес-транзакции; разработано программное обеспечение для анализа надежности бизнес-транзакции с использованием разработанного аппарата моделирования и методики надежности; успешно решен ряд практических задач.

В **Приложении 1** дана пошаговая инструкция по работе с программой, описаны механизмы статистического анализа, сформулированы причины использования отдельных методов, информация по технологии планирования экспериментов. В **Приложении 2** проводится сравнение результатов работы ПКБТ и распространенных аналитических методов расчета надежности.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1. Показатели надежности бизнес-транзакции**

Под надежностью бизнес-транзакции понимается совокупность свойств, относящихся к способности бизнес-транзакции выполняться, а ее участникам согласованно ее выполнять с должным уровнем качества при установленных условиях за установленный период времени. Предложены следующие свойства (атрибуты) надежности: атомарность, согласованность, долговечность, восстанавливаемость, стабильность, отказоустойчивость.

Надежность бизнес-транзакции в виде атрибутов долговечности и согласованности зависит от участников бизнес-транзакции и не зависит от ее собственной структуры и свойств. Так как рассмотрение надежности участников в силу их возможной различной природы (программной, технической, организационной и пр.) трудоемко и специфично для каждой бизнес-транзакции и требует привлечения знаний из различных областей наук, то это не позволяет разработать универсальную методику анализа ее надежности, то было введено понятие внутренне надежной бизнес-транзакции.

Внутренне-надежная бизнес-транзакция способна вместе со своими участниками во время выполнения поддерживать на определенном уровне значения атрибутов, относящихся к ее способности выполняться с должным уровнем качества при установленных условиях за установленный период времени. К атрибутам надежности внутренне-надежной бизнес-транзакции отнесены атомарность, восстанавливаемость, отказоустойчивость и стабильность:

- атомарность бизнес-транзакции предполагает, что она должна либо выполниться целиком, либо не выполниться вообще;
- восстанавливаемость означает возможность восстанавливать работу транзакции в случае отказа как любого из участников, так программного и аппаратного обеспечения;
- стабильность определяется совокупностью свойств, характеризующих частоту отказов как любого из участников транзакции, так программного и аппаратного обеспечения;



- отказоустойчивость бизнес-транзакции предполагает ее способность поддерживать определенный уровень качества функционирования в случаях программных ошибок или ошибок пользователей при ручных операциях.

Каждый атрибут надежности описывается несколькими показателями, которые позволяют количественно его оценить. Выработан следующий набор показателей атрибутов внутренней надежности:

- группа показателей стабильности: вероятность безотказной / безаварийной работы, частота отказов/аварий, наработка на отказ/аварию, интенсивность отказов/аварий;
- группа показателей отказоустойчивости: вероятность избежания аварий / устранения отказа, вероятность компенсации;
- группа показателей атомарности: частный уровень атомарности операций, общий уровень атомарности бизнес-транзакции;
- группа показателей восстанавливаемости: разрешимость отказов, уровень восстанавливаемости.

Приведены формулы расчета показателей, описаны особенности их применения. К примеру, общий уровень атомарности показывает вероятность того, что согласованное состояние системы в ходе бизнес-транзакции не будет нарушено. Рассчитывается как:  $X = \frac{A+B}{C}$ , где  $A$  – количество возвратов к начальному состоянию,  $B$  – количество успешных выполнений,  $C$  – общее количество попыток выполнения бизнес-транзакции. Показатели предназначены для оценки надежности как бизнес-транзакции в целом, так и отдельных функций, участвующих в процессе ее выполнения.

В расчете многих показателей используется понятия отказа, аварии, восстановленного и скомпенсированного отказа. Под отказом бизнес-транзакции понимается событие, заключающееся в нарушении хода выполнения бизнес-транзакции. Авария – отказ, повлекший за собой невозможность дальнейшего выполнения или компенсации бизнес-транзакции. Восстановленным отказом назовем такой отказ, последствия которого были успешно устранены в ходе текущего сеанса выполнения бизнес-транзакции. Компенсация бизнес-транзакции – согласованное изменение состояний участников взаимодействия, приводящее бизнес-транзакцию к начальному состоянию. Скомпенсированным отказом назовем отказ, последствия которого были устранены таким образом, что атомарность бизнес-транзакции не была нарушена.

## **2. Инструмент моделирования бизнес-транзакций на базе окрашенных сетей Петри**

Разработанный инструмент моделирования описывает базовые конструкции и поведенческие шаблоны сервис-ориентированных систем и бизнес-транзакций и, в частности, позволяет проводить оценку предложенных показателей надежности по модели системы. К базовым конструкциям инструмента моделирования отнесены такие понятия, как служба, операция службы, участник взаимодействия, предусловие и постусловие операции, интерфейс операции, интерфейсно-совместимые и интерфейсно-эквивалентные операции, композиция операций и др. Построение модели бизнес-транзакции с помощью этого инструмента позволяет: гарантировать возможность реализации проекта в рамках сервис-ориентированной парадигмы распре-

деленных систем, использовать для оценки бизнес-транзакции предложенные показатели надежности и формулы их расчета, обеспечить совместимость модели с любыми средствами и методиками анализа окрашенных сетей Петри.

К примеру, пусть  $CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)^1$  – это окрашенная сеть Петри, моделирующая взаимодействие сервисов. Тогда отдельная операция службы представлена как:  $O = (t, P^o, A^o, \Sigma^o, V^o, C^o, G^o, E^o)$ , где:

- $t \in T$  – отдельный переход сети Петри;
- $P^o \subseteq P$  – множество входных и выходных позиций такое, что  $P^o = P_{in} \cup P_{out}$ ;
- $P_{in} \subseteq P^o$  – множество входных позиций перехода  $t$ ;
- $P_{out} \subseteq P^o$  – множество выходных позиций перехода  $t$ ;
- $A^o \subseteq P_{in} \times t \cup t \times P_{out}$  – множество дуг, соединяющих переход  $t$  с входными и выходными позициями; под  $A_{in}$  и  $A_{out}$  будем понимать набор входящих и исходящих дуг соответственно;
- $\Sigma^o \subseteq \Sigma$  – это подмножество множества типов данных, используемых в окрашенной сети Петри;
- $V^o \subseteq V$  – подмножество типизированных переменных, используемых операцией;
- $C^o: P^o \rightarrow \Sigma^o$  – функция «окрашивания», ставящая в соответствие каждой позиции подмножество цветов;
- $G^o$  – сторожевая функция, ставящая в соответствие операции сторожевое условие, такая, что:  $Type[G^o(t)] = Bool$ , то есть функция возвращает булево значение;
- $E^o$  – функция выражения над дугой, ставящая в соответствие каждой дуге  $a \in A^o$  выражение такое, что  $\forall a \in A^o : Type[E^o(a)] = C(p)_{ms}$ , где  $p$  – это позиция, соединенная с дугой  $a$ . Под  $E_{in}$  и  $E_{out}$  будем понимать множество выражений над входящими и исходящими дугами соответственно.

Следуя принципам декомпозиции сервисов и бизнес-процессов, определено понятие и условия существования декомпозирующей сети для операции.

Пусть  $CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$  – это окрашенная сеть Петри, моделирующая взаимодействие сервисов, а  $O = (t, P^o, A^o, \Sigma^o, V^o, C^o, G^o, E^o)$  – это отдельная операция сервиса. Тогда для  $O$  будем называть сеть  $CPN' = (P_s, T_s, A_s, \Sigma_s, V_s, C_s, G_s, E_s, I_s)$  декомпозирующей сетью 1-го порядка в случае, если:

- $\forall p_{in} \in P_{in} \exists M_0(p_s): M_0(p_s) = M(p_{in})$  и  $C(p_{in}) = C(p_{s_{in}})$ , где  $P_{in} \subseteq P^o$ ,  $p_s \in P_s$ , а для всех остальных  $p_s \in P_s$  выполняется условие  $M_0(p_s) = \emptyset$ ;
- $\forall p_{out} \in P_{out} \exists M_f(p_s): M_f(p_s) = M(p_{out})$  и  $C(p_{out}) = C(p_{s_{out}})$ , где  $p_s \in P_s$ , под  $M_f$  понимается финальная маркировка, такая что существует конечная последовательность шагов, таких что  $M_0(p_s) \rightarrow M_f(p_s)$ , т.е. финальная маркировка достижима из начальной маркировки  $M_f \in \mathcal{R}(M_0)$  и  $R(M_f) = \emptyset$ , т.е. финальная маркировка мертва. Мертвая маркировка – это маркировка без активных переходов из нее.

Таким образом, все входные позиции операции отображаются как начальная маркировка для вложенной сети, при этом остальные позиции не имеют маркиров-

<sup>1</sup> Математические обозначения, принятые работе, аналогичны используемым в трудах К. Йенсена, основоположника теории окрашенных сетей Петри.

ки. Все выходные позиции формируются из финальной маркировки вложенной сети, достижимой из начальной. Будем называть сеть  $CPN^k$  декомпозирующей сетью  $k$ -го порядка в случае, если она декомпозирует операцию  $O$ , входящую в сеть  $(k - 1)$ -го порядка.

Для ограничения операции в рамках бизнес-процесса воспользуемся условиями, налагаемыми на сеть Петри WF-сетями:  $\forall t \in T_S: \exists Y(t): M' \xrightarrow{Y} \dots \rightarrow M_f$ , где  $(M', M_f) \in \mathcal{R}(M_0)$ .

Бизнес-транзакцию в сервис-ориентированной среде можно представить в виде сети Петри  $BT = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, H, \Omega)$ , если:

- $P$  – конечное множество позиций бизнес-транзакции, среди которых выделяются промежуточные  $P_m$  и стабильные позиции  $P_f$  такие, что  $P = P_m \cup P_f$ ; стабильные позиции можно разделить на входные  $P_{in}$  и выходные  $P_{out}$ , где  $\bullet P_{in} \cap P_{out} \bullet = \emptyset$ ;
- $T$  – конечное множество операций, при этом каждая операция может быть представлена как подсеть Петри или декомпозирована до самостоятельной сети;
- ...далее по аналогии с определением операции;
- $I$  – это функция инициализации, ставящая в соответствие каждой позиции  $p \in P$  выражение инициализации такое, что  $\forall p \in P: Type[I(p)] = C(p)_{ms}$ ;
- пара  $(p, c)$ , где  $p \in P$  и  $c \in C(p)$  – это метка (фишка) сети, определяющая нахождение данных определенной типа в определенной позиции. Маркировка – это комплект меток в позициях сети; маркировка сети определяет состояние бизнес-транзакции;
- начальная маркировка  $M_0$  определяется через вычисление инициализирующих выражений, т.е.  $M_0(p) = I(p)$  для всех  $p \in P$  и является начальным состоянием всех участников бизнес-транзакции;
- финальная маркировка  $M_f$  достигается через конечную последовательность шагов  $Y$ , при этом  $M_f \in \mathcal{R}(M_0)$  и  $\mathcal{R}(M_f) = \emptyset$ ; множество финальных маркировок обозначим за  $\Omega$ ;
- $H$  – конечное множество участников бизнес-транзакции, таких, что  $P = h_1 P \cup h_2 P \cup \dots \cup h_n P$  и  $T = h_1 T \cup h_2 T \cup \dots \cup h_n T$ , где  $hP$  означает, что множество операций  $P$  принадлежит участнику  $h \in H$ .

Для бизнес-транзакции дано определение атомарности, восстанавливаемости, компенсируемости, стабильности, устойчивости и отказоустойчивости с помощью предложенного инструмента моделирования. Дано определение надежной бизнес-транзакции на языке окрашенных сетей Петри.

С помощью разработанного инструмента моделирования дано определение отказа бизнес-транзакции, имитационного прогона и имитационного эксперимента. Приведены формулы для расчета показателей надежности с учетом представления бизнес-транзакции с помощью разработанного инструмента моделирования. Пусть  $BT = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I, H, \Omega)$  – это бизнес-транзакция, надежность которой рассчитывается в ходе имитационного эксперимента  $ES$ . Имитационный эксперимент является набором имитационных прогонов  $YS$ , каждый из которых через последовательность  $n$  шагов  $Y$  переводит бизнес-транзакцию из маркировки  $M_0$  в маркировку  $M_n$ , которая является мертвой маркировкой. Имитационный прогон  $YS$  с  $n$  шагами

считается успешным, если  $\exists M_n \in \mathcal{R}(M_0): M_0 \xrightarrow{YS} M_n$ , где  $M_n \in \Omega$ . Тогда, например, показатель общего уровня атомарности рассчитывается как  $X = \frac{|ES''| + |ES'|}{|ES|}$ , где  $ES'' \subseteq ES, \forall YS \in ES'': YS \neq \emptyset, M_0 \xrightarrow{YS} M_0; ES' \subseteq ES, \forall YS \in ES': \exists M_n \in \mathcal{R}(M_0): M_0 \xrightarrow{YS} M_n, M_n \in \Omega$ .

Соблюдение бизнес-транзакцией в течение своей работы границ этих показателей и будет являться отражением ее надежности. В связи с этим формулировка задачи оценки надежности выглядит так: пусть задано множество мощностью  $n$  показателей и их граничных значений в виде множества двоек  $A = \{(a^b, a^t)_i\}, i = 1..n$ , где  $a^b, a^t$  – верхние и нижние границы  $i$ -го показателя соответственно. А бизнес-транзакция характеризуется набором показателей  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ . Тогда бизнес-транзакция будет называться надежной в том случае, если  $\forall i: a_i^b \leq w_i \leq a_i^t$ . Таким образом, предопределение номенклатуры показателей надежности и их границ перед началом работ над бизнес-транзакцией позволяет сказать, является ли бизнес-транзакция надежной с точки зрения ожидаемых параметров или нет.

### 3. Алгоритм анализа устойчивости бизнес-транзакции

Показано, что стабильность бизнес-транзакции в виде условий  $\forall t \in T_s: \exists Y(t): M' \xrightarrow{Y} \dots \rightarrow M_f$  (условие сервисной операции) для  $(M', M_f) \in \mathcal{R}(M_0)$  и  $\forall M' \in \mathcal{R}(M_0) \nexists Y: M' \xrightarrow{Y} M'$  (условие устойчивости) трудно проверить анализом достижимости окрашенной сети Петри в условиях специфики бизнес-транзакции. Поэтому для проверки стабильности был разработан вспомогательный алгоритм, использующий теорию цепей Маркова. Основной целью алгоритма является доказательство достижимости целевых состояний системы путем анализа поглощающих состояний, значений фундаментальной матрицы и эргодических классов множества переходов.

Бизнес-транзакция  $BT$ , смена маркировок которой описывается конечной цепью Маркова, является устойчивой, если множество поглощающих состояний включает только финальные маркировки и не существует возвратных состояний, отличных от финальных маркировок. Пусть  $S$  – множество поглощающих состояний, тогда:  $S \subset A, S = \Omega$ , где  $A$  – пространство состояний системы.

Также можно определить условие: если для бизнес-транзакции  $BT$  определена фундаментальная матрица  $N = (I - Q)^{-1} = \{\mu_{ij}\}$ , и  $\forall i, j: \mu_{ij} \leq 1$ , то бизнес-транзакция может быть устойчивой. То есть не должно быть маркировок, в которые транзакция переходит более одного раза. В силу различных причин это условие не может гарантировать устойчивость, однако позволяет определить потенциально опасные маркировки, если условие нарушается.

Основная часть алгоритма состоит из следующих шагов.

1. Определить все поглощающие маркировки бизнес-транзакции: финальные позиции и позиции отказов (если есть).
2. Провести имитационный эксперимент с моделью бизнес-транзакции для установления вероятностей перехода между состояниями.
3. Построить цепь Маркова для всех маркировок бизнес-транзакции.

4. Построить фундаментальную матрицу и сопутствующие матрицы для проверки условий устойчивости.
5. Если полученная цепь удовлетворяет условиям устойчивости, то бизнес-транзакция может быть устойчивой.
6. Иначе необходимо найти такое подмножество маркировок, которое удовлетворяет условию возможного бесконечного цикла. Если такое множество существует, то необходимо построить цепь Маркова для переходов сети Петри этого множества, что может позволить выявить эргодический класс, состоящий из всех переходов бесконечного цикла. Если множество переходов состоит из одного перехода, то он может являться исполнителем бесконечного цикла. В остальных случаях нельзя формально определить источник проблемы устойчивости. На практике это часто является признаком того, что бизнес-транзакция во время имитационного эксперимента не успела выполниться до конца.

#### **4. Методика и программное обеспечение анализа надежности бизнес-транзакции**

Методика анализа надежности разработана с учетом выводов, полученных в предыдущих главах, и рассмотрено решение практической задачи проектирования бизнес-транзакции с заданной надежностью с помощью программного комплекса и предложенной методики.

Методика включает в себя этапы системного анализа бизнес-транзакции и состоит из следующих шагов.

1. Идентификация и отделение бизнес-транзакции как системы от предметной области. Формирование целей существования системы и определение ее границ.
2. Анализ структуры и состава бизнес-транзакции. Определение участников и процессов, которые они выполняют. Определение связей между процессами. Определение зон ответственности хореографии и оркестровки.
3. Формулировка и анализ проблемы оценки надежности исследуемой системы. Определение взаимосвязи надежности с другими характеристиками. Оценка разрешимости проблемы.
4. Оценка возможностей повышения надежности по процессам и в целом для бизнес-транзакции путем введения восстанавливающих и компенсирующих связей: выявление технологии интеграции участников и определение характера связанности.
5. Определение целевых качественных и количественных показателей надежности. Определение нормативных значений этих показателей, если требуется. Определение множества исследуемых операций и характеристик их надежности.
6. Первичное конструирование модели бизнес-транзакции с помощью окрашенных сетей Петри.
7. Если сложность бизнес-транзакции невысока и существуют необходимые ресурсы, то возможно аналитическое исследование модели: определение ее внутренней надежности по схеме бизнес-транзакции. Если полученных данных достаточно или нет возможности использовать программный комплекс имитационного моделирования, то СТОП.
8. Инициация нового эксперимента: загрузка файла со схемой в среду имитатора, определение параметров имитационного эксперимента.

9. Выбор исследуемых процессов, задание характеристик их надежности и методов повышения надежности через восстанавливающие или компенсирующие сети.
10. Проведение имитации работы бизнес-транзакции.
11. Анализ результатов имитационного моделирования: показателей надежности по заданным параметрам системы, чувствительности надежности системы к надежности исследуемых операций, анализ устойчивости с помощью цепей Маркова.

Если цели анализа надежности за одну итерацию не достигаются, то в схему транзакции вносятся изменения и этапы 8-11 повторяются.

Разработанный программный комплекс является клиент-серверным приложением и способен одновременно проводить несколько имитационных экспериментов для разных исследователей. Его структура показана на рис. 2. Интерфейс пользователя реализован в виде веб-приложения на языках HTML и JavaScript. Сервер приложений, вычислительные библиотеки и среда управления симулятором на языке Perl. Используемая реляционная база данных поддерживается СУБД PostgreSQL. ПКБТ во время имитации способен взаимодействовать с любыми сторонними программами (используя сервис-ориентированную парадигму интеграции), что позволяет включать в эксперимент ручные операции или проводить тестирование оборудования, не ограничивая тем самым сложность модели. Это же свойство позволяет, например, исследовать надежность частично-готовой системы, тестируя уже разработанные компоненты во время имитации.

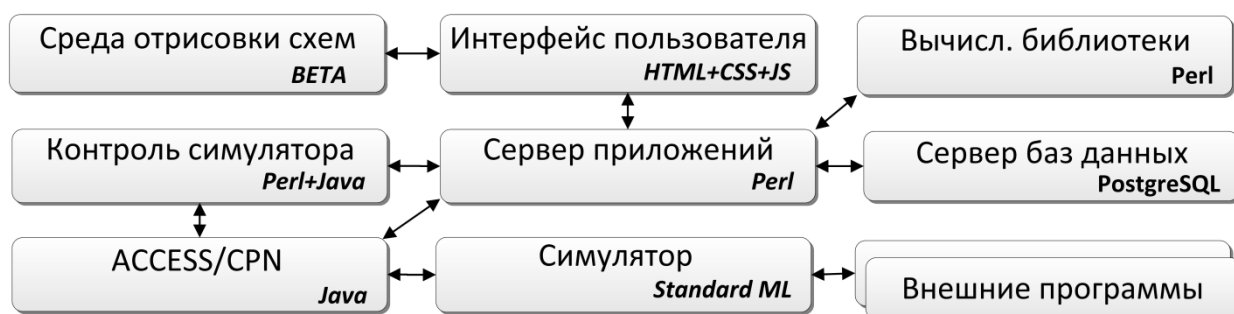


Рис. 2. Структура программного комплекса

Отметим, что среда отрисовки схем, библиотека ACCESS/CPN и симулятор разработаны работниками Технического университета Эйнховена и распространяются под лицензией GNU GPL. Таким образом, ПКБТ полностью создан с помощью свободного программного обеспечения.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях, рекомендованных ВАК

1. Артамонов, И. В. Анализ устойчивости бизнес-транзакций с помощью цепей Маркова / И. В. Артамонов // Информационные системы и технологии. – 2015. – № 3 (89). – С. 41-46.
2. Артамонов, И. В. Исследование надежности работы интернет-магазина с помощью окрашенных сетей Петри / И. В. Артамонов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – Т. 22. – № 25 (152). – С. 42–47.

3. Артамонов, И. В. Моделирование сервис-ориентированной архитектуры с помощью окрашенных сетей Петри / И. В. Артамонов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12. – № 2. – С. 5–13.
4. Артамонов, И. В. Программный комплекс анализа надежности бизнес-транзакции / И. В. Артамонов // Информационные системы и технологии. – 2014. – № 5 (85). – С. 5–13.
5. Артамонов, И. В. Моделирование сервисной композиции с помощью окрашенных сетей Петри / И. В. Артамонов // Вестник Новосибирского государственного университета экономики и управления. – 2013. – № 2. – С. 180–187.
6. Артамонов, И. В. Использование окрашенных сетей Петри для моделирования бизнес-транзакций в сервис-ориентированной среде / И. В. Артамонов // Известия иркутской государственной экономической академии (Байкальский государственный университет экономики и права). – 2013. – № 5. – С. 25–31.
7. Артамонов, И. В. Бизнес-транзакции: характеристики и отличительные особенности / И. В. Артамонов // Бизнес-информатика. – 2012. – № 2 (20). – С. 29–34.
8. Артамонов, И. В. Свободное программное обеспечение: преимущества и недостатки / И. В. Артамонов // Известия ИГЭА. – 2012. – № 5. – С. 122–125.
9. Артамонов, И. В. Описание бизнес-процессов: вопросы стандартизации. / И. В. Артамонов // Прикладная информатика. – 2011. – № 3. – С. 20–28.

#### **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ**

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617516. Программный комплекс «Анализ надежности бизнес-транзакций» / И. В. Артамонов // Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2014.

#### **В других изданиях**

11. Artamonov, I. V. Coloured Petri Net usage for modeling a business transaction in a service-oriented environment / I. V. Artamonov // Innovative Information Technologies: Materials of the International scientific (practical conference). – 2014. – Т. 3. – № 3. – С. 397–402.
12. Артамонов, И. В. Слабое связывание как фактор эволюции технологий интеграции распределенных систем / И. В. Артамонов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2014. – № 1. – С. 294–297.
13. Артамонов, И. В. Моделирование надежных В2В-взаимодействий с помощью окрашенных сетей Петри / И. В. Артамонов // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2013. – Т. 1. – С. 146–148.
14. Артамонов, И. В. Надежность В2В-взаимодействия в сервис-ориентированной среде / И. В. Артамонов // APRIORI. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – № 5. – С. 1–13.
15. Артамонов, И. В. Внутренне-надежная бизнес-транзакция / И. В. Артамонов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. – 2013. – Т. 1. – С. 510–512.

16. Артамонов, И. В. Надежность бизнес-транзакций в сервис-ориентированной среде / И. В. Артамонов // Инновационные информационные технологии. – 2013. – Т. 4. – № 2. – С. 12–19.
17. Артамонов, И. В. Моделирование бизнес-транзакций с помощью CPN Tools. / И. В. Артамонов // Современные информационно-телекоммуникационные технологии в управлении социально-экономическими системами / под общ. ред. А. П. Суходолова. – Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2013. – С. 106 – 132.
18. Артамонов, И. В. Оркестровка и хореография: подходы к описанию композитных бизнес-процессов / И. В. Артамонов // Применение математических методов и информационных технологий в экономике. – 2011. – № 10. – С. 65–75.
19. Артамонов, И. В. Современные стандарты описания и исполнения бизнес-процессов / И. В. Артамонов // Применение математических методов и информационных технологий в экономике. – 2010. – № 9. – С. 5–31.

Подписано в печать 14.09.2015 г.

Формат бумаги 60 × 84 1/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,3. Заказ 5228. Тираж 100 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ИПО ФГБОУ ВПО  
«Байкальский государственный университет экономики и права»  
664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11.

---