

Использование сетей Петри для оптимизации параллельных бизнес-процессов

К.В. Самойлова¹, Е.Б. Замятина²

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет,

²Пермский филиал Национального Исследовательского университета
«Высшая школа экономики»

В современной науке наблюдается тенденция к использованию методов, объединяющих сведения из различных областей знаний. Методы, изначально разработанные для решения задач в области параллельных и асинхронных систем, могут быть адаптированы для исследования бизнес-процессов, предоставляя новые возможности для повышения их эффективности. В статье рассматривается использование сетей Петри и систем массового обслуживания (СМО) для анализа параллельных бизнес-процессов на примере работы маркетплейса. Применение этих математических схем дает возможность выявить узкие места бизнес-процесса, а затем принять решение об устранении этих узких мест, используя методы онтологического моделирования. Новизна работы заключается в применении для оптимизации бизнес-процессов многомодельного подхода, объединяющего имитационное и онтологическое моделирование.

Ключевые слова: сети Петри, СМО, параллельный бизнес-процесс, онтологическое моделирование.

1. Введение

В последние годы наблюдается устойчивая тенденция к усложнению бизнес-процессов. Это приводит к увеличению расхода ресурсов, удлинению времени выполнения задач и снижению производительности, что, в свою очередь, является причиной разного рода ошибок и потерь. Традиционные методы анализа не всегда способны в полной мере исследовать бизнес-процессы, выявить их узкие места и предложить методы по усовершенствованию бизнес-процессов. В ответ на эти вызовы, в современной науке наблюдается тенденция к интеграции знаний из различных областей, что позволяет применять более эффективные и гибкие решения.

Цель данной статьи – исследовать возможности применения методов, изначально разработанных для параллельных и асинхронных систем для анализа и оптимизации бизнес-процессов. В частности, исследуется использование сетей Петри и систем массового обслуживания (СМО) для моделирования и анализа бизнес-процессов. Эти методы позволяют рассматривать процессы с разных точек зрения, выявляя их сильные и слабые стороны, и предлагать пути для улучшения этих процессов. Применение онтологического моделирования позволяет структурировать знания о процессах, принимать более обоснованные решения по их реорганизации и оптимизации. Этот многомодельный подход открывает новые возможности для повышения эффективности бизнес-процессов, учитывая как количественные, так и качественные аспекты. Его применение позволяет не только выявлять и устранять узкие места, но и оценивать влияние изменений в отдельных частях процесса на всю систему в целом. Использование имитационного моделирования дает более реалистичное представление о функционировании процессов в условиях неопределенности, снижает риски и помогает минимизировать возможные потери. В статье продемонстрировано применение этого подхода на примере работы маркетплейса.

2. Применение сетей Петри и СМО в анализе бизнес-процессов

Изначально разработанные как математический инструмент для моделирования систем с параллельными компонентами [1], сети Петри все чаще используются для анализа и оптимизации бизнес-процессов. Этот математический аппарат особенно эффективен при моделировании

сложных процессов, позволяя исследовать параллельные подпроцессы и их взаимное влияние друг на друга.

В работе [2] сделан вывод, что возможность анализировать достижимость и ограниченность отдельных участков сети Петри способствует выявлению потенциальных проблем и неэффективных элементов бизнес-процесса. Автор представляет алгоритм, позволяющий трансформировать бизнес-процессы, описанные в формате ARIS EPC, в одноцветные сети Петри. Автор отмечает, что графические методы представления моделей, хотя и были разработаны для упрощения описания и оптимизации бизнес-процессов, недостаточно удобны для проведения глубокого анализа. В то же время сети Петри обладают широкими аналитическими возможностями для исследования дискретных систем.

Предложенный алгоритм состоит из следующих шагов: каждому элементу модели EPC сопоставляется переход сети Петри, каждой связи – позиция; вводятся дополнительные позиции для обозначения начала и завершения процесса; логические операторы преобразуются в набор переходов и позиций. Такое преобразование позволяет проводить более глубокий анализ и оптимизацию бизнес-процессов, выявлять узкие места и тупики, а также определять все возможные варианты развития процесса.

Ван дер Аалст провел большое исследование, в котором сети Петри рассматриваются как мощный инструмент для формализации и оптимизации бизнес-процессов. В статье [3] основное внимание уделяется разработке и использованию подкласса сетей Петри, известного как Business-Procedure nets (BP-сети), которые специально адаптированы для представления и анализа процедур, лежащих в основе бизнес-процессов. Они имеют два специальных места: *i* (начало процесса) и *o* (конец процесса). Задачи моделируются переходами, а частичный порядок выполнения задач – местами, соединяющими эти переходы.

Одной из ключевых тем статьи является надежность (soundness) процедур, моделируемых с помощью BP-сетей. Надежность – это свойство, которое гарантирует, что для любого случая процедура завершится корректно, и в конце процесса в месте "о" будет находиться метка, в то время как все остальные места будут пустыми. Автор предлагает метод проверки звучания в полиномиальное время, что делает этот подход практически применимым для анализа сложных бизнес-процессов. Это свойство особенно важно в контексте реинжиниринга бизнес-процессов, где корректность и надежность процессов имеют первостепенное значение.

В работе [4] авторы выбрали использование сетей Петри для реинжиниринга бизнес-процессов. Они приходят к выводу, что для такого сложного и динамичного процесса как реинжиниринг, традиционных методов недостаточно. Сети Петри, напротив, могут быть адаптированы для моделирования различных аспектов бизнес-процессов, включая временные параметры, стохастические элементы и ресурсные ограничения. Авторы разработали программное обеспечение под названием PETROMAN, которое основано на стохастических цветных сетях Петри. Это программное обеспечение предназначено для управления сложными проектами, включая реинжиниринг бизнес-процессов.

В работе показан пример применения PETROMAN на процессе разработки продукта. Были смоделированы все этапы, начиная от создания чертежей и заканчивая испытаниями и подготовкой документации. Авторы провели симуляцию процессов, чтобы оценить их поведение в различных условиях. Например, в процессе разработки продукта они могли наблюдать, как распределяются ресурсы и как изменения в одном этапе процесса влияют на другие этапы. Они обнаружили, что определенные этапы, такие как подготовка чертежей и испытания, занимали больше времени, чем планировалось, что указывало на недостаточно четкую и правильную организацию процессов. Это позволило им предложить альтернативные варианты процесса, которые могли бы сократить время его выполнения и улучшить использование ресурсов.

Работа [5] исследует проблему количественного анализа бизнес-процессов. Авторы отмечают, что традиционные методы количественного анализа бизнес-процессов, такие как анализ потоков и симуляция, часто сталкиваются с компромиссом между точностью и скоростью. Анализ потоков быстр, но не учитывает вероятностные распределения, что снижает его точность. Симуляция, напротив, обеспечивает высокую точность, но требует значительных вычислительных ресурсов и времени, что делает ее неэффективной для оперативного анализа и оптимизации в реальном времени. Поэтому основная задача, которая решается в статье, заключается в разра-

ботке метода, который позволил бы быстро и точно оценивать временные характеристики бизнес-процессов, такие как ожидаемое время задержки, обработки и загрузка ресурсов. Авторы выбрали метод анализа на основе систем массового обслуживания из-за его способности сочетать быстродействие и точность. СМО позволяют моделировать сложные взаимодействия и вероятностные распределения, что делает их подходящими для анализа бизнес-процессов. Однако, существующие модели СМО часто имеют ограничения, такие как недостаточная поддержка параллельных задач и распределения ресурсов на основе ролей. Для решения этих проблем авторы работы [5] предложили новый метод, который включает следующие ключевые элементы: преобразование процессов из BPMN (Business Process Model and Notation – язык моделирования бизнес-процессов) в СМО, моделирование совместного использования ресурсов и алгоритм для анализа временных характеристик.

Для иллюстрации предложенного метода авторы приводят пример анализа сквозного процесса в телекоммуникационной компании. Этот процесс моделируется с использованием BPMN и затем преобразуется в сеть массового обслуживания. Результаты анализа показывают, что метод позволяет точно оценивать временные характеристики процесса и выявлять узкие места.

В статье [6] авторами так же ставится вопрос исследования и оптимизации времени выполнения бизнес-процессов. Основная цель – разработать метод оценки времени выполнения бизнес-процессов, который позволил бы оптимизировать операционные процессы в компаниях, особенно в условиях нестабильной и сложной бизнес-среды. Авторы предлагают математическую модель бизнес-процесса «Запрос-Ответ» в виде открытой экспоненциальной сети массового обслуживания с несколькими классами клиентов. Это позволяет моделировать различные типы запросов и их маршрутизацию через различные подпроцессы, такие как управление контактами, обработка запросов и проверка удовлетворенности клиентов.

С использованием формул теории СМО авторы работы [6] выводят выражения для расчета среднего времени пребывания заявки в системе, что соответствует времени выполнения бизнес-процесса. Для оптимизации времени выполнения предлагается использовать симплекс-метод линейного программирования. Это позволяет определить минимальное время выполнения процесса при заданных ограничениях на пропускную способность узлов. Предложенный метод проиллюстрирован на примере процесса «Запрос-Ответ» в телекоммуникационной компании, что подчеркивает применимость метода в реальных бизнес-сценариях.

3. Описание программного комплекса

Как было рассмотрено ранее, эффективное управление бизнес-процессами становится критически важным для успеха компаний, при этом традиционных методов недостаточно для их анализа и оптимизации. В данной работе предложен программный комплекс, предназначенный для исследования бизнес-процессов с использованием многомодельного подхода. В частности, будут использованы модели в основании, которых находятся такие математические формализмы как СМО и сети Петри. Онтологический подход, интегрированный в программный комплекс, обеспечивает принятие решений на основе экспертных знаний, что позволяет более точно и эффективно управлять бизнес-процессами.

Итак, первый шаг – это построение и валидация концептуальной модели M (концептуальной моделью считается модель, полученная в результате интервьюирования заказчика). После этого описывают модель бизнес-процесса M_x в одной из нотаций, используемых для моделирования бизнес-процессов (x – обозначение нотаций BPMN, IDEF, UML и пр.). Далее выполняют трансформацию модели бизнес-процесса M_x в имитационную модель M_yz , описанную с применением языка имитационного моделирования (здесь y – обозначение одного из языков имитационного моделирования, например GPSS, AnyLogic, NetLogo), основанного на математических формализмах (z), таких как системы массового обслуживания, сети Петри, цепи Маркова, теории графов и т.д. Трансформация проводится по определенным правилам с использованием онтологического подхода. После проведения трансформации необходимо убедиться, что полученная имитационная модель адекватно описывает изначально описанный бизнес-процесс. Для оценки достоверности имитационной модели происходит ее валидация с вычислением семантической близости онтологий имитационной модели и концептуальной модели бизнес-процесса [8]. При подтверждении валидности имитационной модели запускают имитационный эксперимент, в противном

случае имитационную модель проектируют заново. Если в ходе имитационного эксперимента выявляются риски, то из онтологии рисков извлекают знания о способах предотвращения рисков. Эти знания используют для модификации исходной модели M_x . Онтология рисков разрабатывается на основании экспертных знаний и тем самым помогает формализовать знания о процессе, интегрировать информацию о различных его аспектах и оценить эффект от возможных изменений. На рис. 1 представлен алгоритм описанного программного комплекса.



Рис. 1. Алгоритм определения надежности бизнес-процесса, выявления и устранения рисков

Таким образом, программный комплекс представляет собой мощный инструмент, обеспечивающий комплексный анализ бизнес-процессов в динамике. Отдельным преимуществом является то, что для применения предложенного комплекса нет жестких требований к использованию конкретной нотации или языка имитационного моделирования, что позволяет бизнес-аналитикам выбирать любые доступные инструменты.

4. Проектирование бизнес-процесса работы маркетплейса

Для демонстрации предложенного подхода рассмотрим пример бизнес-процесса работы маркетплейса. В процессе участвует 4 вида агентов: Поставщик товара, покупатель, который этот товар хочет купить и два работника (прием и сбор товара). Этот бизнес-процесс включает параллельные операции. В то время, когда поставщик предоставляет товар покупателю, покупатель может выбирать и складывать его в корзину в клиентском приложении. Для визуального представления работы маркетплейса выбрана нотация BPMN (рис. 2).

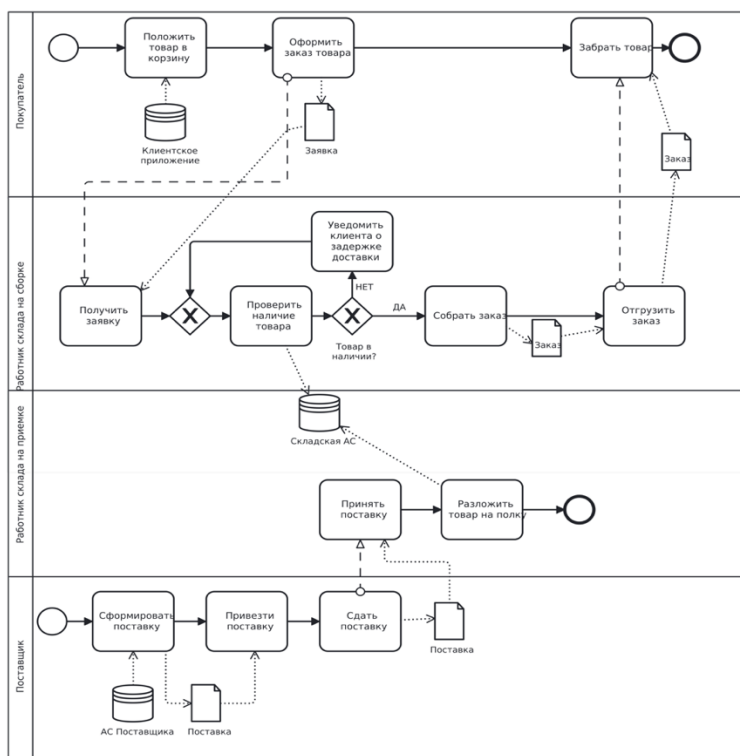


Рис. 2. Бизнес-процесс работы маркетплейса

Далее модель M_x рекомендуется преобразовать в имитационную модель M_{yz} с использованием определенных правил трансформации [9]. В конкретном случае имитационная модель представлена в среде AnyLogic (математическая схема – система массового обслуживания (СМО)). Известно, что среднесуточный объем заказов составляет 100 единиц, поставок – 120. Сборка одного заказа занимает в среднем 1 час. Время доставки товара до клиента варьируется от 12 до 48 часов. Доставка до склада занимает от 12 до 120 часов при среднем значении 18 часов. Приемка и размещение товара на складе требует от 2 до 7 часов.

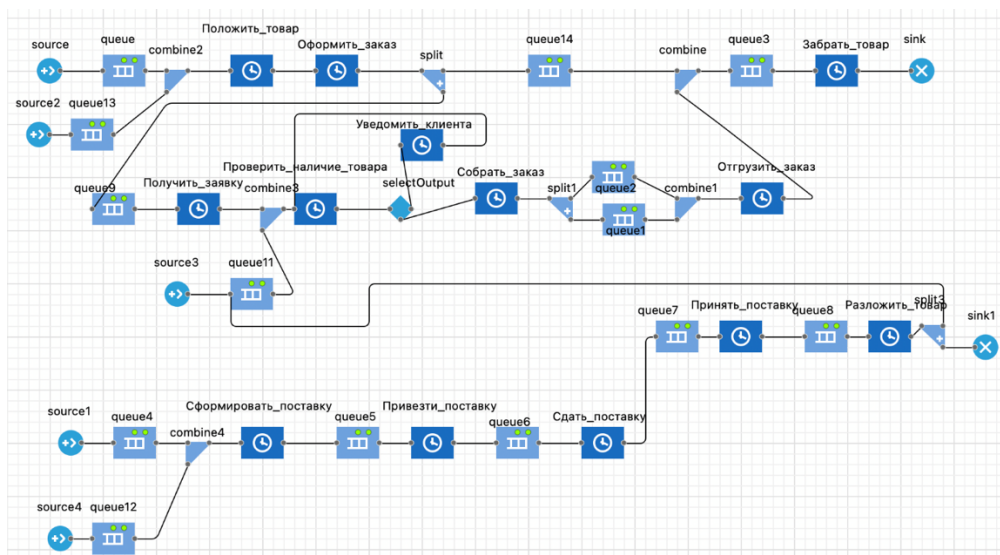


Рис. 3. Бизнес-процесс работы маркетплейса (СМО)

В результате имитационного эксперимента риски в бизнес-процессе не были выявлены и эксперимент остановлен после запуска максимально допустимого числа динамически создаваемых агентов. При этом по количеству агентов в разных каналах обслуживания видно, что все привезенные поставки были приняты, а из 7476 заявок на покупку товара только 8 отгружено.

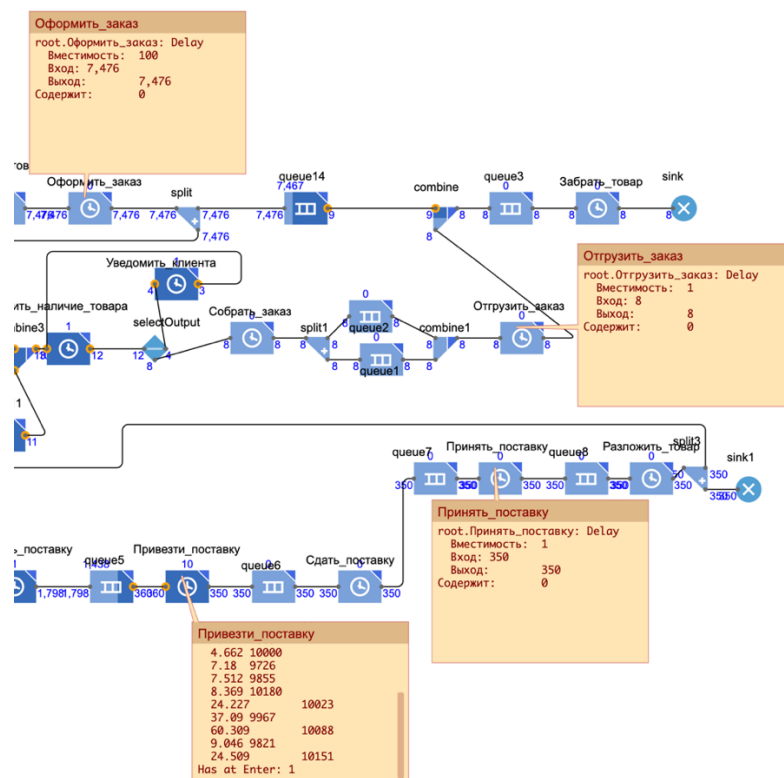


Рис. 4. Результат имитационного эксперимента

После анализа системы массового обслуживания, которая моделирует бизнес-процесс работы маркетплейса, становится очевидным, что он имеет сложную параллельную структуру. В частности, заказы от клиентов поступают и обрабатываются одновременно с поставками товаров от продавцов, что создает асинхронную среду, где несколько операций могут происходить одновременно. Для более глубокого исследования и визуализации таких параллельных процессов особенно подходят сети Петри. Изначально разработанные для моделирования асинхронных и параллельных систем, сети Петри позволяют наглядно представить взаимодействие между различными компонентами бизнес-процесса. Это делает их идеальным инструментом для выявления узких мест, конфликтов и других потенциальных проблем, которые могут возникнуть в процессе работы маркетплейса. Поэтому произведем трансформацию BPMN модели в имитационную модель, в основании которой лежат сети Петри. Представим модель на языке Netlogo [10]. Полученная сеть Петри представлена на рис. 5.

Начнем анализ модели, полученной в результате трансформации BPMN модели в сеть Петри. Методы анализа сетей Петри можно разделить на две группы, каждая из которых фокусируется на различных аспектах поведения и структуры сети [11].

К первой группе относится анализ поведенческих свойств. Сюда относится проверка сети на достижимость. В контексте бизнес-процессов это означает, что мы можем определить, возможно ли достичь определенного состояния (например, завершения заказа) из начального состояния. Анализ достижимости помогает убедиться, что все желаемые состояния процесса доступны и что процесс может быть завершен успешно.

К этой же группе относится проверка сети на живость. Живость сети Петри связана с отсутствием тупиковых ситуаций и гарантирует, что система может продолжать функционировать бесконечно без блокировок [12]. В бизнес-процессах это означает, что все переходы могут быть активированы в какой-то момент времени, и процесс не застрянет в определенном состоянии. Анализ живости помогает выявить потенциальные тупики и обеспечить бесперебойное выполнение процесса.

Еще один подход – проверка на наличие мертвых переходов. Мертвыми называются переходы, для которых не существует такого состояния сети, при котором переход срабатывает. Наличие таких переходов в сетях бизнес-процесса говорит о наличии неиспользуемых подпроцессов.

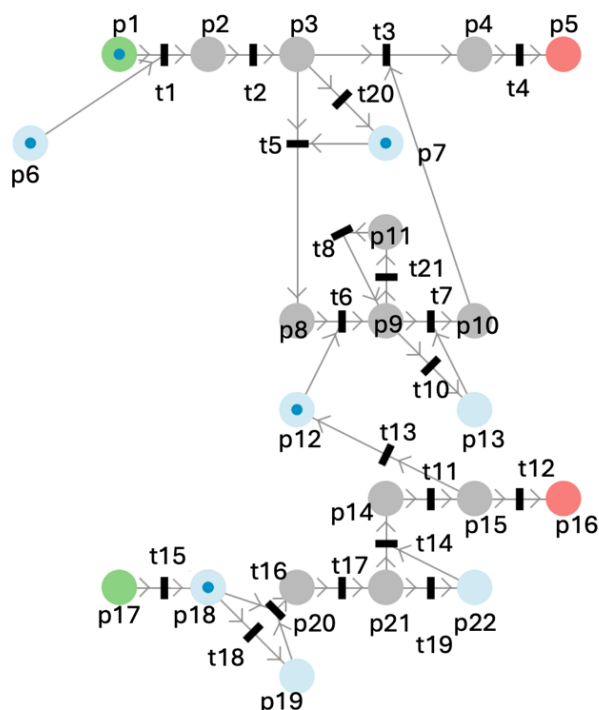


Рис. 5. Бизнес-процесс работы маркетплейса (сеть Петри)

Ко второй группе относятся методы, которые нацелены на выявление множества позиций и переходов, которые могут влиять на поведение системы. В работе [13] автор называет среди них ловушку, сифон и цикл (рис. 6).

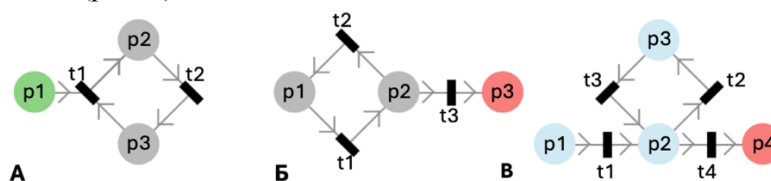


Рис. 6. Ловушка (А), Сифон (Б), Цикл (В)

Ловушка – это состояние, из которого нет переходов в другие состояния. Таким образом, маркер, попавший в ловушку больше, не может ее покинуть. Сифон – это набор позиций, из которого маркер, будучи туда помещенным, тем же переходом сразу извлекается. Поэтому маркер не может попасть в это состояние. Циклы – это замкнутые пути в сети Петри, где система может многократно проходить через одни и те же состояния. Необходимо отметить, что ловушка в отличие от цикла срабатывает при любой маркировке сети, а цикл только при определенной [13].

Итак, рассмотрим полученную сеть Петри бизнес-процесса работы маркетплейса. Для проверки на достижимость необходимо выбрать состояния сети, которых она должна достигнуть. Говоря о работе маркетплейса, бизнесу важно, чтобы продавец мог хранить свой товар на складе, а покупатель мог его купить. По результатам имитационного эксперимента видим, что в конечных позициях, которые представляют собой события «Принять заказ» и «Разложить товар» находятся маркеры, а значит это состояние достижимо (рис. 7).

При анализе сети на живость важно убедиться, что она способна выполняться бесконечно, то есть все переходы будут срабатывать в процессе выполнения. Для активации переходов необходимо, чтобы во входных позициях присутствовали маркеры. Следовательно, необходимо гарантировать, что все стартовые позиции всегда будут содержать маркеры.

Будем считать, что позиции p1 и p17 всегда содержат маркеры, так как они описывают процесс создания корзины клиентом и формирования поставки продавцом. Рассмотрим участок сети p1 – p6 – t1 – p2, который описывает процесс добавления выбранного товара в корзину с помощью клиентского приложения. Если позиция p6 не будет содержать маркер, то переход t1 не сможет сработать, и сеть не будет считаться живой (см. рис. 8). С точки зрения бизнес-процесса

это означает, что недоступность клиентского приложения представляет собой риск для выполнения всего бизнес-процесса.

Если же позиция p6 содержит маркер в ходе имитационного эксперимента срабатывает каждый переход, а значит они не мертвые.

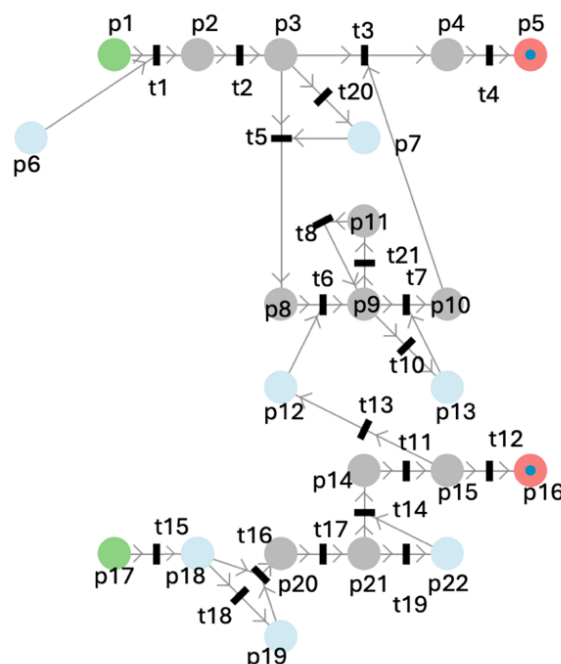


Рис. 7. Достижимость состояний

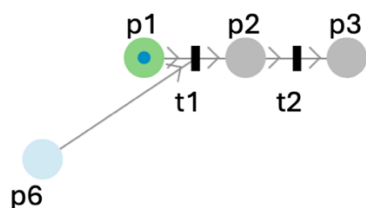


Рис. 8. Мертвый переход t1

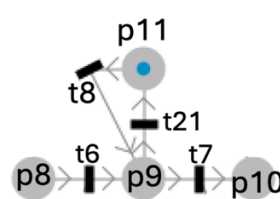


Рис. 9. Цикл

Так как в итоге все маркеры достигают конечных позиций, мы можем говорить об отсутствии ловушек и сифонов, так как они характеризуются застреванием маркеров в одном состоянии. Однако в рассматриваемой сети есть участок $t6 - p9 - t21 - p11 - t8 - p9$, который является циклом (рис. 9).

В бизнес-процессе данный участок отражает следующую ситуацию: после получения клиентского заказа происходит проверка наличия товара на складе. Если товар отсутствует, клиенту отправляется уведомление о задержке поставки, после чего проверка наличия товара повторяется. Этот цикл продолжается до тех пор, пока товар не будет готов к сборке. С точки зрения бизнеса, этот участок представляет собой узкое место, которое может препятствовать своевременному завершению бизнес-процесса и требует оптимизации.

Итак, при анализе полученной сети Петри были выявлены ключевые узкие места в бизнес-процессе работы маркетплейса. Одним из таких узких мест является участок сети, где после получения клиентского заказа происходит проверка наличия товара на складе. Этот цикл может привести к задержкам в обработке заказов и снижению удовлетворенности клиентов. Кроме того, существует риск, связанный с недоступностью клиентского приложения, что может привести к остановке процесса добавления товаров в корзину и, как следствие, невыполнению бизнес-процесса.

После того как в ходе исследования сети Петри бизнес-процесса были выявлены узкие места, необходимо обратиться в онтологию рисков (рис. 10). Онтология разработана на основе знаний эксперта в предметной области и состоит из 3 классов: «Риски», «Контрмеры» и «Последствия». Для извлечения экспертных знаний предлагается использовать SPARQL.

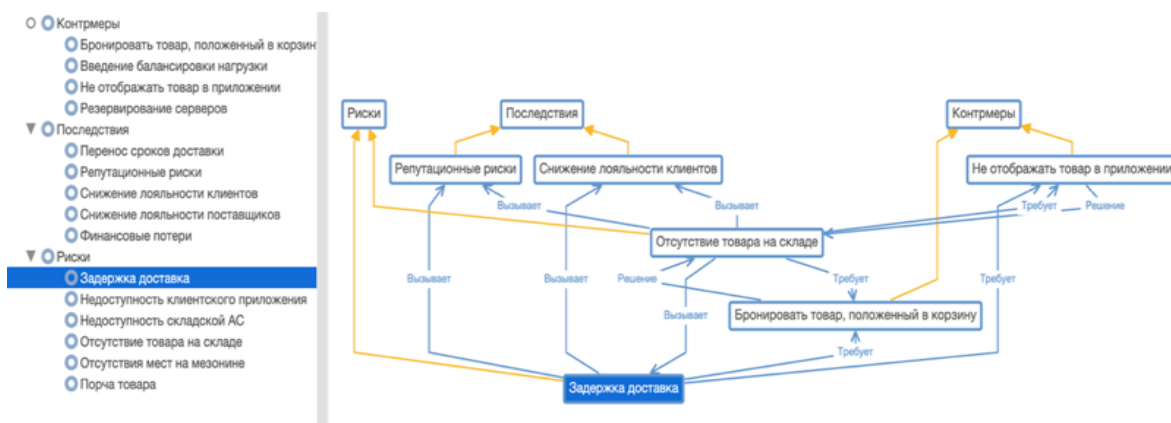


Рис. 10. Онтология рисков

Выявив риск недоступности клиентского приложения и отсутствия товара на складе, обращаемся к онтологии (рис. 11). В результате принимаем решение не отображать товар в приложении, если его нет на сайте.

Query

Entities that match **all** of the following:

Is a subclass of ☐ Direct

Has a relationship on that has a value equal to

Execute

2 results

- Бронировать товар, положенный в корзину
- Не отображать товар в приложении

Рис. 11. SPARQL

Далее изменяем первоначальную модель в соответствии с принятым решением (рис. 12).

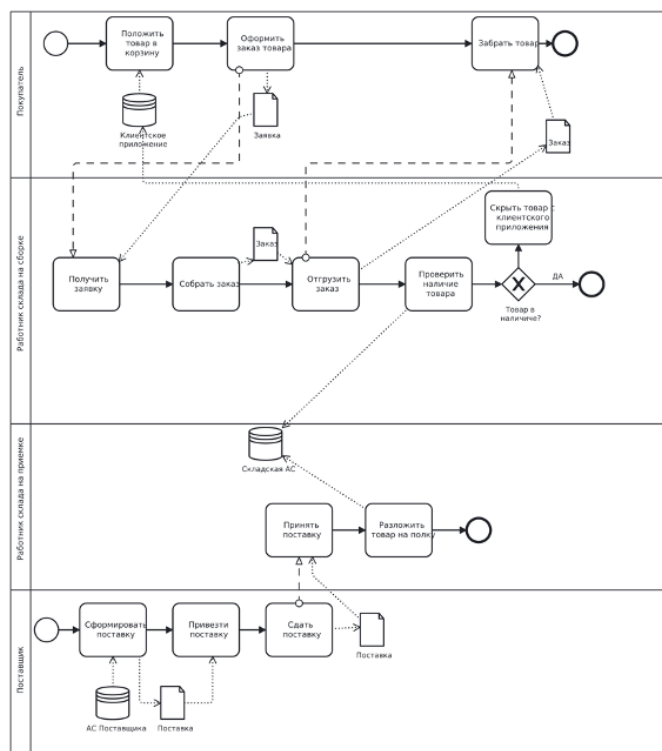


Рис. 12. Оптимизированный бизнес-процесс работы маркетплейса

5. Заключение

В работе рассмотрено применение сетей Петри и теории очередей для анализа и оптимизации бизнес-процессов. Исследование показало, что использование сетей Петри позволяет эффективно выявлять узкие места в бизнес-процессах и предлагать пути их оптимизации. Применение СМО открывает новые возможности для быстрой и точной оценки временных характеристик процессов, что позволяет повысить их эффективность и снизить затраты. Онтологический подход помогает принимать решения, основанные на экспертных знаниях с учетом особенностей процесса и контекста, в котором он происходит. В результате, предложенные изменения в моделях бизнес-процессов способствуют повышению их эффективности и снижению рисков, связанных с их выполнением.

Основное внимание было уделено исследованию и оптимизации бизнес-процессов с использованием сетей Петри, что позволило получить глубокое понимание их динамики и выявить ключевые узкие места. Сети Петри, благодаря своей способности моделировать параллельные и конкурентные процессы, оказались особенно эффективными для анализа сложных бизнес-процессов. Использование сети Петри позволило исследовать достижимость финального состояния бизнес-процесса, оценка на наличие мертвых переходов выявила потенциальное узкое место. Проверка сети на наличие определенного множества позиций и переходов, выявила цикл в процессе, который влияет на скорость работы всего бизнес-процесса в целом.

Итак, предложенный подход позволяет оптимизировать бизнес-процесс, минимизировать задержки и избежать блокировок. Итеративный процесс дает возможность анализировать, как изменения в одной части бизнес-процесса влияют на весь процесс в целом. Использование имитационных моделей помогает выявить узкие места, которые замедляют процесс или требуют чрезмерных ресурсов. Это позволяет получить более реалистичное представление о функционировании бизнес-процесса в реальных условиях, снизить риски и минимизировать последствия.

Литературы

1. Петерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. 264 с.
2. Доррер М.Г. Алгоритм преобразования моделей бизнес-процессов в одноцветные сети Петри // Моделирование и анализ информационных систем. 2010. Т. 17, № 2. С. 5–16.
3. van der Aalst W.M.P. A class of Petri nets for modeling and analyzing business processes // Computing Science Report. Vol. 9526. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 1995.
4. Somasundaram K., Krishnaiahchetty O. Managing Business Process Reengineering with Petri Nets. 2001. P. 280–285.
5. Peters S., Kerner Y., Dijkman R. et al. Fast and accurate quantitative business process analysis using feature complete queueing models // Information Systems. 2022. Vol. 104. P. 1–17. DOI: 10.1016/j.is.2021.101892.
6. Samouylov K., Gaidamaka Y., Zaripova E. Analysis of Business Process Execution Time with Queueing Theory Models // Communications in Computer and Information Science. 2016. P. 363–378. DOI: 10.1007/978-3-319-44615-8_28.
7. Zamyatina E., Churin D., Lanin V. et al. Simulation Model Validation Based on Ontological Engineering Methods // Proceedings of the 14th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (IC3K 2022). KEOD. SciTePress, 2022. P. 237–244.
8. Ngom A., Kamara-Sangare F. Assessing Similarity Value between Two Ontologies // Proceedings of the 10th International Joint Conference on Knowledge Discovery, 2018. P. 343–350.
9. Kalenkova A.A., van der Aalst W.M.P., Lomazova I.A., Rubin V.A. Process mining using BPMN: relating event logs and process models // Software and Systems Modeling. 2015. Vol. 16, no. 4. P. 1019–1048.

10. Banos A., Lang C., Marilleau N. *Agent-Based Spatial Simulation with NetLogo*. ISTE Press, Elsevier, 2015. 222 p.
11. Мараховский В.Б., Розенблюм Л.Я., Яковлев А.В. Моделирование параллельных процессов. Сети Петри. СПб.: Профессиональная литература, 2014. 400 с.
12. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications // *Proceedings of the IEEE*. 1989. Vol. 77, no. 4. P. 541–580. DOI: 10.1109/5.24143.
13. Федоров И.Г. Метод отображения исполняемой модели бизнес-процесса в сети Петри // *Статистика и экономика*. 2013. № 4. С. 147–149.