Г. А. Ботвин, *канд. техн. наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, g.botvin@spbu.ru*

Д. Л. Белых, *аспирант Санкт-Петербургского государственного университета, dashabelikh@gmail.com*

Мультиагентное моделирование динамики цепей поставок

В статье рассмотрены методы моделирования цепей поставок и обосновано использование мультиагентного подхода, позволяющего оценить влияние ситуационных стратегий на общую производительность системы. Разработана мультиагентная модель, включающая агентов-поставщиков, агентов-производителей, агентов дистрибуторов и агентов-ритейлеров. Приведен пример анализа динамики системы, позволяющий оценить производительность логистической цепи при изменении уровней материальных запасов, цен и прибыли для каждого агента.

Ключевые слова: моделирование, управление цепями поставок, мультиагентные системы, уровень материальных запасов.

Введение

Популярность концепции управления цепями поставок обусловлена высокой конкуренцией на рынках товаров и услуг, которая вынуждает компании искать новые способы сокращения издержек и повышения прибыли. Данная концепция базируется на идее о том, что обеспечение согласованной работы участников цепи поставок позволит снизить затраты и повысить удовлетворенность конечных потребителей. Согласно рассматриваемой концепции, конкурировать должны не участники цепи поставок между собой, а цепи поставок друг с другом, что означает необходимость заинтересованности участников цепи поставок в повышении производительности друг друга. В рамках управления цепями поставок мультиагентные системы можно рассматривать как мощное средство их моделирования. В статье представлен аналитический обзор концепций управления и моделирования цепей поставок на основе использования мультиагентного подхода. Модель управления цепями поставок реализуется на основе технологии создания программных агентов, каждый из которых выполняет роль одного из участников цепи.

Управление цепями поставок

Анализ концепций управления цепями поставок в настоящее время представлен в ряде актуальных публикаций [2, 5–7]. Появление и развитие новых подходов к управлению цепями поставок связывают с публикацией статьи [10], в которой выдвигается идея о необходимости координировать весь поток продукции, идущий от поставщика к конечному потребителю через производителей и каналы распределения. На начальных этапах развитие концепции основывалось на логистике и лишь незначительно отличалось от расширенного толкования интегрированной логистики. Управление цепями поставок получило самостоятельное развитие только в 1990-е гг., когда было четко обозначено различие между

интегрированной логистикой и управлением цепями поставок, а также сформулированы цели, задачи и принципы развития нового научного направления [2].

В основе концепции управления цепями поставок лежит понятие цепи поставок. Цепь поставок начинает существовать в тот момент, когда несколько компаний начинают совместно производить те или иные товары или нематериальные услуги. Цепь поставок можно рассматривать как набор компаний, занимающихся проектированием, сбытом, производством и распределением продуктов и услуг в интересах конечного потребителя [5]. В свою очередь управление цепями поставок — это набор подходов, использующихся для эффективной интеграции поставщиков, производителей, складов и магазинов таким образом, что товар производится и распределяется с минимальными затратами при удовлетворении требований к качеству обслуживания.

В качестве основной проблемы управления цепями поставок стоит выделить эффект «кнута» [2], возникающий из-за скачкообразных изменений спроса потребителей. Суть его заключается в увеличении амплитуды колебаний объема заказов по мере удаления от конечных потребителей. Следствием эффекта «кнута» становится увеличение уровня запасов, снижение гибкости и уровня сервиса. Также внутри цепи поставок возникают не только производственные проблемы, но и проблемы управления возвратами, взаимоотношениями с заказчиками, что требует от участников цепи поставок синхронизации совместной деятельности и операций.

Компании, входящие в цепь поставок, должны обладать возможностями быстро реагировать на постоянно изменяющиеся условия, к которым относятся изменение потребительского спроса, волатильность, характеризующая изменения стоимости ресурсов и их доступность. Слабо предсказуемая изменчивость среды приводит к существенному усложнению принятия управленческих решений должностными лицами, в результате возникает необходимость разработки процедур, позволяющих автоматизировать процессы управления цепями поставок.

Одной из технологий, которая может быть успешно применена при разработке автоматизированных средств управления цепями поставок, являются мультиагентные системы, состоящие из множества автономных или полуавтономных агентов, в которых знания и контроль распределены и агенты общаются путем формализованных сообщений. Поскольку операции в цепях поставок связаны с координацией нескольких лиц, принимающих решения, применение мультиагентных систем для их изучения и усовершенствования выглядит как вполне естественный выбор.

Создание автоматизированных средств на основе мультиагентных систем эффективно прежде всего в распределенных системах, где агенты территориально распределены, получают данные из разных источников и должны координировать свои действия для повышения эффективности совместной деятельности. Цепь поставок можно представить как сеть автономных и полуавтономных бизнес-сущностей, коллективно осуществляющих закупку, производство и распределение одного или нескольких товаров и/или услуг [5].

Утверждение о том, что мультиагентные системы успешно применяются при решении проблем, имеющих распределенный характер, подтверждается существованием большого количества исследований и практических кейсов, содержание которых подтверждает их эффективность в управлении цепями поставок, а именно при решении сложных вычислительных задач для осуществления поддержки принятия решений или моделирования цепей поставок для изучения их динамики.

Моделирование в цепях поставок

Моделирование цепей поставок необходимо для понимания и предсказания поведения системы. Его использование позволяет

наблюдать за поведением цепи поставок в течение времени, что дает возможность одновременно изучить организационные процессы принятия решений для анализа зависимости участников цепи поставок друг от друга и изучить соответствие методов координации и политик принятия решений. Более того, моделирование может использоваться в сочетании с оптимизацией, что позволит проверить значимость и последствия результатов моделирования. Использование мультиагентных технологий при моделировании нацелено на создание некоторой мультиагентной системы, которая имитирует выполнение сценария реального мира, позволяет изучать проблемы, возникающие в управлении цепями поставок.

Моделирование цепи поставок включает в себя разработку репрезентативной модели и ее выполнение в соответствии с набором гипотез, связанных с разными сценариями. Анализ и интерпретация результатов моделирования позволят достичь большей производительности цепи поставок за счет эффективной организации и координации ее процессов и функциональности.

Имитационное моделирование имеет некоторые преимущества при моделировании цепи поставок по сравнению с другими подходами [8]. Так, моделирование процессов, основанное на теории систем, обычно не позволяет получить оценку поведения динамической системы с течением времени, когда система функционирует в условиях стохастического воздействия окружающей среды. В то же время моделирование на основе математической формализации цепи поставок, которое может быть реализовано либо на основе теории управления при помощи дифференциальных уравнений, либо на основе теории оптимизации, требует применения аппроксимации и часто ограничено.

В свою очередь имитационное моделирование, основывающееся на системной динамике, подразумевает, что структура цепи поставок и управление потоками определяют производительность цепи. Позднее стало применяться непрерывное моделирование (*continuous simulation*) и имитационное моделирование дискретных событий (*discrete event simulation*). В настоящее время для моделирования цепей поставок предпочитают использовать дискретно-событийное моделирование, и именно на нем основывается тенденция применения агентного подхода.

Моделирование цепей поставок может быть использовано для описательных или нормативных целей. При анализе результатов моделирования цепей поставок появляется возможность повышения эффективности системы за счет выбора лучших решений, которые необходимо принять в отношении структурных, организационных, управленческих и технологических преобразований. Моделирование, основанное на агентах, и имитационное моделирование значительно расширяют возможности дискретно-событийного моделирования для описательных и нормативных целей в контексте сложных цепей поставок.

Моделирование динамики цепи поставок

Рассмотрим мультиагентное моделирование на примере моделирования цепи поставок, представленной на рис. 1, в которую входят поставщики, производитель, склады и несколько ритейлеров. Рассматриваемая модель применима практически в любой отрасли, ориентированной на предоставление товаров, работ и услуг и представляет собой обобщенную структуру, описывающую процессы взаимодействия заинтересованных сторон, осуществляющих поставки, производство, распространение и реализацию продукции. Моделирование происходит на основе использования агентов, каждый из которых представляет собой одного из участников цепи. Модель включает агентов-поставщиков, агентов-производителей, агентов-дистрибуторов и агентов-ритейлеров.

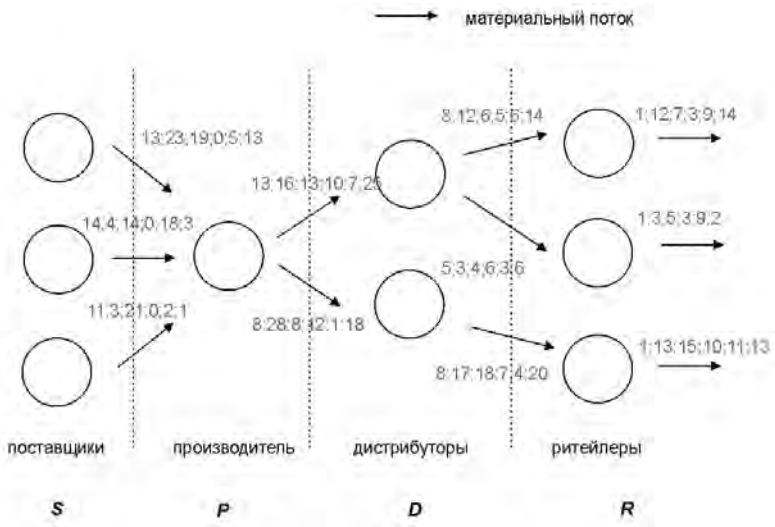

Рис. 1. Моделируемая цепь поставок

Fig. 1. Simulated supply chain

С ростом сложности цепи поставок становится все сложнее предугадать, как те или иные изменения в поведении участников цепи поставок скажутся на производительности всей цепи. Целью моделирования является изучение динамики цепи поставок. В рамках моделирования делается предположение о том, что прошлые действия влияют на текущее состояние системы. Текущие и прошлые оценки процесса используются для предсказания его поведения в будущем.

Моделирование проводится в течение некоторого числа временны́х периодов. В каждый из них агент закупает ресурсы у агента из предыдущего узла и продает ресурсы агенту из узла последующего.

Соответствующая математическая модель выглядит следующим образом:

$$l_k(t) = l_k(t-1) + \sum_{k'}^{n} q_{k'k}(t) - \sum_{k''}^{n} q_{kk''}(t) \quad (1)$$

$$\forall k \in \{W, D\}, t \in T;$$

$$l_k(t) = l_k(t-1) + \sum_{k'}^{n} q_{k'k}(t) - q_k(t) \quad (2)$$

$$\forall k \in \{R\}, t \in T$$

$$y_k(t) \le Y_k;$$

$$profit_k(t) = \sum_{k''}^{n} q_{kk''}(t)\, price_k - \sum_{k'}^{n} q_{k'k}(t) \cos ts_k - TC_k \quad (3)$$

$$\forall k \in \{W, D, R\}, t \in T$$

В модели используются следующие обозначения:

S — поставщик (*supplier*);

P — производитель (*producer*);

W — склад (*warehouse*);

R — ритейлер (*retailer*);

k — текущий узел / агент;

k' — предыдущий узел / агент (*upstream node / agent*);

k'' — последующий узел / агент (*downstream node / agent*);

l_k — уровень материальных запасов (*inventory level*);

L_k — максимальный уровень запасов (*max inventory level*);

$q_{k'k}$ — количество ресурсов, перевезенных по маршруту $k'k$ (*quantity*);

q_k — количество доставленных товаров *k*-му узлу;

$profit_k$ — прибыль *k*-го агента;

$price_k$ — цена, по которой k-й агент продает единицу товара;
$costs_k$ — цена, по которой k-й агент покупает единицу товара;
TC — затраты на перевозку.

Во время моделирования в каждый момент времени каждый агент рассчитывает свой уровень запасов на основе данных об уровне запасов в предыдущий момент времени, количества закупаемых ресурсов и количества продаваемых ресурсов по формуле (1) для производителя и дистрибуторов и по формуле (2) для ритейлеров. Уровень запасов поставщиков материалов не рассчитывается, а моделирование начинается с поставки поставщиками производителю материалов и заканчивается реализацией товаров ритейлерами конечным потребителям. Производительность цепи поставок в рамках моделирования будет оцениваться при помощи расчета прибыли каждого агента по формуле (3).

Каждый агент характеризуется некоторыми исходными данными, а именно: максимальным уровнем запасов, который изменяется в зависимости от роли агента в цепи, стоимостью закупки единицы товара и стоимостью продажи, которые могут отличаться даже у агентов с одинаковыми ролями в силу различий в осуществлении своей деятельности. Также каждый агент при продаже товаров на следующий узел цепи поставок оплачивает транспортировку товаров на следующий уровень. В данной модели предполагается, что затраты на транспортировку не зависят от количества перевозимого товара и постоянны для каждого агента во все моменты времени.

Обобщенные исходные данные для моделирования представлены по результатам анализа финансово-хозяйственной деятельности компаний, входящих в цепь поставок, производящую компьютерное оборудование. В ходе моделирования агенты, основываясь на исходных данных из табл. 1, на основе формул (1–3) рассчитывали уровень материальных запасов, свои затраты, выручку и прибыль. Динамику изменения материальных запасов агентов в каждый момент времени можно отследить по графику, изображенному на рис. 2.

На рисунке 1 через точку с запятой представлено количество материалов (для поставщиков) или товаров (для остальных участников цепи), которые агенты отправляют на следующий уровень в первый, второй, третий, четвертый, пятый и шестой моменты времени.

Прибыль агентов, выбранная в качестве оценки производительности как отдельных участников, так и всей цепи представлена на рис. 3. Она может служить индикатором того, выгодно ли участнику цепи поставок продолжать свою деятельность, сотрудничая с данными компаниями.

Таблица 1. Исходные данные
Table 1. Initial data

Агент	Максимальный уровень запасов, шт., L_k	Стоимость закупки единицы товара, долл., $costs_k$	Стоимость продажи единицы товара, долл., $price_k$	Затраты на осуществление перевозки партии товара, долл., TC
Производитель	50	28	40	150
Дистрибутор А	25	45	53	50
Дистрибутор Б	25	45	56	41
Ритейлер А	15	53	67	0
Ритейлер Б	15	53	66	0
Ритейлер В	15	56	71	0

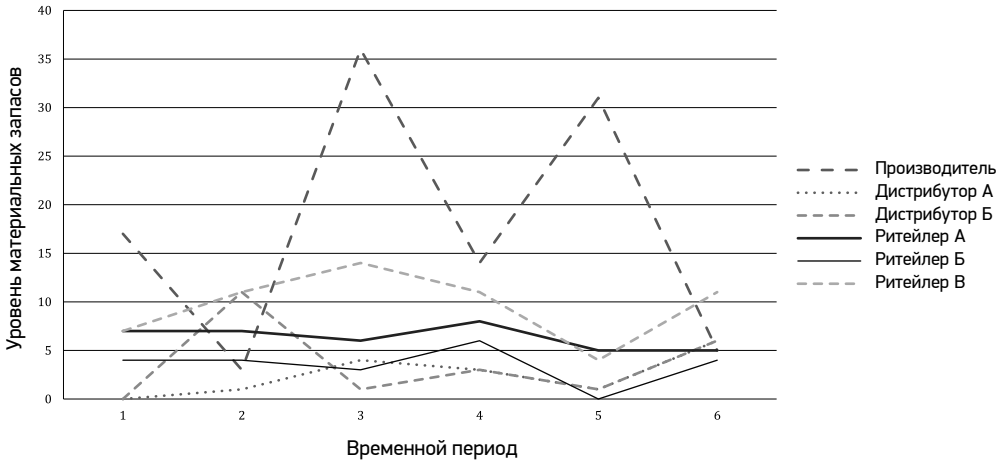

Рис. 2. Уровень материальных запасов участников цепи поставок
Fig. 2. Inventory level of supply chain members

Полученные при моделировании результаты позволяют проанализировать уровень материальных запасов и прибыль участников цепи поставок. На основе этих данных возможно скорректировать будущее поведение контрагентов с целью снизить уровень материальных запасов и максимизировать прибыль цепи поставок, а также исключить из цепи контрагентов, с которыми сотрудничество не является взаимовыгодным.

Представленная модель может быть использована для исследования производительности цепи поставок при изменении условий осуществления деятельности, таких как цены, по которым закупают и продают материалы или товары и пр. Также применение данного подхода позволит проанализировать динамику цепи при использовании компаниями других стратегий осуществления своих текущих операций.

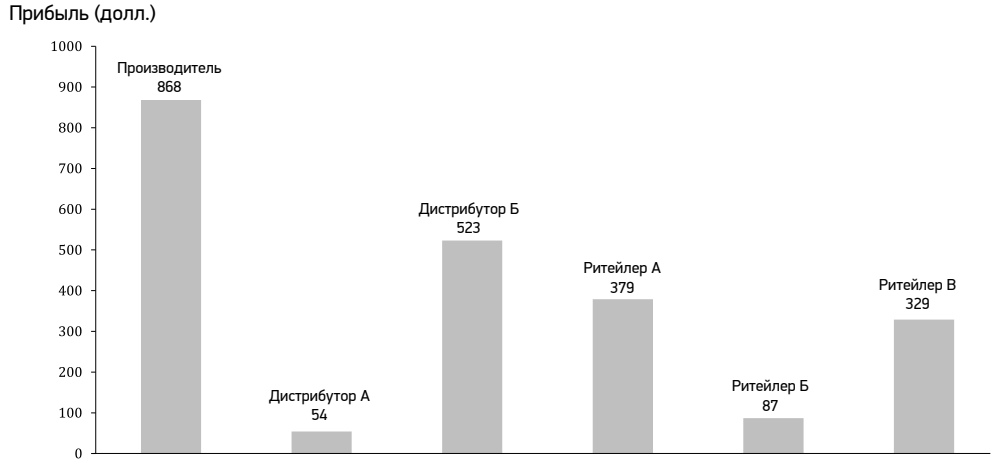

Рис. 3. Прибыль участников цепи поставок
Fig. 3. Profit of supply chain members

Заключение

Применение мультиагентных систем при моделировании цепи поставок обусловлено распределенной природой цепи поставок, участники которой являются независимыми, территориально распределенными сущностями, которые для достижения общих целей должны действовать согласованно.

Предложенная в данном исследовании модель нацелена на изучение динамики цепи поставок для изучения протекающих в ней процессов. Необходимость использования таких моделей обусловлена ростом сложности цепей поставок, который значительно затрудняет их анализ. В рамках дальнейших исследований, помимо проведения сравнительного анализа различных подходов к моделированию, возможно усложнение модели за счет как увеличения числа участников цепи поставок, так и учета более сложных сценариев реального мира, например, задержек при поставке товаров, осуществление возвратов и др.

Также в рамках дальнейших исследований для реализации мультиагентной системы целесообразно использовать возможности агентных платформ. Благодаря тому, что мультиагентные системы применяются не только в управлении цепями поставок, но и в других сферах, таких как робототехника, контроль и управление распределенными системами и процессами, в процессах сбора и анализа информации в распределенных базах знаний, у исследователя есть возможность обоснованного выбора инструментов для мультиагентного моделирования.

Список литературы

1. *Граничин О. В.*, *Кияев В. И.* Информационные технологии управления предприятием. URL: http://www.intuit.ru/studies/courses/13833/1230/info (дата обращения 06.02.2017).
2. *Кирюков С. И.*, *Кротов К. В.* Развитие концепции управления цепями поставок: маркетинговый подход // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 8. Менеджмент. 2007. №4. С. 97–111.
3. *Мухаметзянов И. З.*, *Мешалкин В. П.* Имитационная многоагентная нечетко-логическая модель принятия маркетинговых решений промышленного предприятия в условиях неопределенности // Прикладная информатика. 2014. №3 (51). С. 100–110.
4. *Ремезова Е. М.*, *Чернов В. Г.* Модель поддержки принятия решения при планировании проекта внедрения КИС на основе нечетких множеств второго порядка // Прикладная информатика. 2014. №3 (51). С. 110–118.
5. *Chaib-draa B.*, *Müller J. (ed.).* Multi-agent based supply chain management. Berlin: Springer Science & Business Media, 2006. — 450 с.
6. *Habib M*. Supply Chain Management (SCM): Theory and Evolution. Croatia: InTech Open Access Publisher, 2011. С. 17–34.
7. *Minis I.*, *Zeimpekis V.*, *Dounias G.*, *Ampazis N*. Supply Chain Optimization, Design, and Management: Advances and Intelligent Methods — IGI Global, 2011. — 319 с.
8. *Labarthe O. et al*. Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context // Simulation Modelling Practice and Theory. 2007. Vol. 15. No. 2. С. 113–136.
9. *Martin S. et al*. A multi-agent based cooperative approach to scheduling and routing // European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 254. No. 1. С. 169–178.
10. *Oliver R. K.*, *Webber M. D*. Supply-chain management: logistics catches up with strategy // Outlook. 1982. Vol. 5. No. 1. С. 42–47.

References

1. Granichin O. V., Kijaev V. I. *Informacionnye tehnologii upravlenija predprijatiem* [Information technology for enterprise management]. Available at: http://www.intuit.ru/studies/courses/13833/1230/info (accessed 06.02.2017).
2. Kirjukov S. I., Krotov K. V. *Razvitie koncepcii upravlenija cepjami postavok: marketingovyj podhod* [The development of the supply chain management concept: a marketing approach]. *Vestnik of Saint Petersburg University*, 2007, series 8, no. 4, pp. 97–111 (in Russian).
3. Mukhametzyanov I., Meshalkin V. Simulation multiagent fuzzy logic model for industrial companies marketing decision making under uncertainty. *Prikladnaya informatika* — Journal of Applied Informatics, 2014, no. 3 (51), pp. 100–110 (in Russian).
4. Remezova E., Chernov V. Simulation multiagent fuzzy logic model for industrial companies marketing decision making under uncertainty. *Prikladnaya informati-*

ka — Journal of Applied Informatics, 2014, no. 3 (51), pp. 110–118 (in Russian).
5. Chaib-draa B., Müller J. (ed.). Multi-agent based supply chain management, Berlin: Springer Science & Business Media, 2006, 450 p.
6. Habib M. Supply Chain Management (SCM): Theory and Evolution. Croatia: InTech Open Access Publisher, 2011, pp. 17–34.
7. Ioannis Minis, Vasileios Zeimpekis, Georgios Dounias, Nicholas Ampazis. Supply Chain Optimization, Design, and Management: Advances and Intelligent Methods, USA, IGI Global, 2011, 319 p.
8. Labarthe O. et al. Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context, Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, vol. 15, no. 2, pp. 113–136.
9. Martin S. et al. A multi-agent based cooperative approach to scheduling and routing, European Journal of Operational Research, 2016, vol. 254, no. 1, pp. 169–178.
10. Oliver R. K., Webber M. D. Supply-chain management: logistics catches up with strategy, Outlook, 1982, vol. 5, no. 1, pp. 42–47.

G. Botvin, *Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, g.botvin@spbu.ru*
D. Belykh, *Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, dashabelikh@gmail.com*

Multi-agent based simulation of supply chain dynamics

The concept of supply chain management is based on the idea that coordinating the activity of supply chain members will reduce costs and increase the satisfaction of end-customers. It assumes that supply chain members should not compete with each other, they should compete with other supply chains. The supply chain can be described as a complex system hence it's become complicated to analyze how one or another action will effect on the supply chain. Simulation of supply chains is used for understanding and predicting systems behavior. One of the possible solutions to implement a simulation of such complex system as supply chain based on usage of multi-agent systems. Multi-agents due to distributed nature are well suited for modeling interaction of supply chain members. The usage of multi-agent systems in the simulation aimed at a creation of some system that simulates the execution of a real world scenario. This paper presents a model for multi-agent supply chain simulation. Agents of the multi-agent system in proposed model are represented supply chain members, like suppliers, producers, distributors, retailers. Each agent gets materials or goods from upstream supply chain node and sends goods to the downstream node. It calculates current inventory level. Supply chain performance in proposed model is measured by a profit of supply chain members. This model can be reused multiple times for measuring how changes in supply chain member' behavior will result in the whole supply chain.

Keywords: simulation, supply chain management, multi-agent systems, inventory level.

About authors:
G. Botvin, *PhD in Technique*, *Professor*;
D. Belykh, *Postgraduate student*

For citation:
Botvin G., Belykh D. Multi-agent based simulation of supply chain dynamics. *Prikladnaya informatika* — Journal of Applied Informatics, 2017, vol. 12, no. 4 (70), pp. 114–121 (in Russian).