

Применение мультиагентного подхода для моделирования инновационной деятельности сетевых технологических компаний

Application of a multi-agent approach for modeling innovation activities in industrial networks



С. Г. Редько,
Д. Т. Н., С. Н. С., директор Высшей школы
✉ redko_sg@spbstu.ru

S. G. Redko,
doctor of technical sciences,
senior researcher,
director of the Higher school



Ж. В. Бурлуцкая,
младший научный сотрудник, ассистент,
лаборатория «Цифровое моделирование
индустриальных систем»
✉ zhanna.burlutskaya@spbpu.com

Zh. V. Burlutskaya,
junior researcher, assistant, laboratory
of digital modeling of industrial systems

Высшая школа проектной деятельности и инноваций в промышленности; Институт машиностроения, материалов и транспорта;
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
The Higher school of project management and innovation in industry; Institute of mechanical engineering, materials and transport;
Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

Технологические сотрудничества в рамках ведения инновационной деятельности являются устоявшимся инструментом реагирования на экономические и технологические изменения. При этом исследования в области поддержки принятия решений для эффективной реализации инновационного потенциала объединений технологических компаний не теряют актуальности за счет значимости совместной деятельности технологических компаний в процессе реализации исследований и разработок для экономического развития регионов. Однако, существующие инструменты поддержки принятия решений по управлению инновационными процессами сетевых объединений технологических компаний ограничены в части учета мультиагентных взаимодействий отдельных компаний сети в процессе реализации совместной деятельности, в частности в процессе распределения общих ресурсов. В рамках данной работы предлагается гибридный подход к моделированию инновационной деятельности сетевых объединений технологических компаний на базе инструментов теории игр и мультиагентного подхода. Целью исследования является алгоритмическая адаптация стратегий взаимодействия внутренних агентов сетевых объединений технологических компаний, как основы мультиагентной модели распределения ресурсов в процессе реализации инновационных разработок в сетевых объединениях технологических компаний. В ходе работы приводится исследование типовых взаимодействий интеллектуальных агентов, а также их применимости в контексте моделирования взаимодействий отдельных агентов системы сетевых объединений технологических компаний. Результаты работы вносят вклад в развитие методологических и инструментальных средств моделирования децентрализованных организационных систем.

Technological cooperation in the framework of innovation activities is an established tool for responding to economic and technological changes. At the same time, research in the field of decision-making support for the effective realization of the innovative potential of industrial networks does not lose relevance due to the importance of joint activities of technology companies in the process of research and development for the economic development of regions. However, the existing decision support tools for managing innovation processes of industrial networks are limited in terms of taking into account the multi-agent interactions of individual network companies in the process of implementing joint activities, in particular in the process of allocating common resources. In this paper, we propose a hybrid approach to modeling the innovation activities of industrial networks based on game theory tools and a multi-agent approach. The aim of the study is the algorithmic adaptation of strategies for the interaction of internal agents of network associations of technology companies, as the basis of a multi-agent resource allocation model in the process of implementing innovative developments in network associations of technology companies. The paper provides a study of typical interactions of intelligent agents, as well as their applicability in the context of modeling the interactions of individual agents of a system of industrial networks. The results of the work contribute to the development of methodological and instrumental modeling tools for decentralized organizational systems.

Ключевые слова: инновационная деятельность, моделирование организационных систем, мультиагентные взаимодействия, сетевые объединения технологических компаний.

Keywords: innovative activity, modelling of organisational systems, multiagent interactions, industrial networks.

Введение

Динамически развивающиеся технологические рынки требуют от участников адаптивных моделей управления, позволяющих своевременно реагировать на экономические и технологические изменения, в том числе за счет кооперации компаний друг с другом [1, 2]. Объединяясь, технологические компании формируют единый пул взаимодополняющих интеллектуальных и финансовых ресурсов, которые обладают большим потенциалом для создания высокотехнологичных продуктов в сравнении с возможностями отдельных компаний [1-6]. Однако, в подобных объединениях вместе с увеличением ресурсов увеличивается количество центров принятия решений и, соответственно, организационная система становится децентрализованной. Переход к децентрализованной или распределенной системе принятия решений усложняет процессы

научно-исследовательских разработок в части согласования разнородных целей, оптимизации процессов и оценки эффективности результатов деятельности [1, 7, 8]. При этом результаты деятельности подобных крупных сетевых объединений напрямую влияют на реализацию инновационного потенциала регионов. Так, инновационные центры, зачастую, используют не только собственный научно-исследовательский опыт, но и ведут партнерские исследования в крупных государственных научных центрах и образовательных организациях [7-9], соответственно, деятельность этих центров благоприятно влияет на развитие инновационного потенциала регионов за счет повышения инновационной активности в образовательных организациях, создании новых рабочих мест и производстве высококачественной продукции. Таким образом, научно-исследовательская деятельность сетевых объединений технологических компаний требует особого внимания

к инструментам поддержки принятия решений, что обуславливает актуальность исследований в данной области [1, 9].

Несмотря на то, что исследования в области управления сетевыми объединениями технологических компаний реализуются с конца прошлого века, решение задачи распределения ресурсов в процессе реализации исследований и разработок с учетом различных стратегий взаимодействия компаний сети не представлено в научном дискурсе в полной мере, при этом представлены исследования, в которых приводится обсуждение перспектив применения мультиагентного подхода для моделирования системы стратегического управления инновационной деятельностью сетевых объединений технологических компаний и выделение его преимуществ, подчеркивается актуальность применения данного инструмента [10, 11]. В рамках данной работы предлагается расширение базы научных исследований в области применения мультиагентного подхода для моделирования сложных организационных систем за счет перехода от концептуальных моделей к разработке мультиагентной модели распределения ресурсов в процессе реализации инновационных разработок в сетевых объединениях технологических компаний, отличающейся учетом стратегий взаимодействия компаний сети в процессе распределения общего пула ресурсов на реализацию инновационных продуктов, и позволяющей рассчитывать план реализации инновационных продуктов в соответствии параметрами стратегий и ограничениями по ресурсам. Таким образом, целью исследования является алгоритмическая адаптация стратегий взаимодействия внутренних агентов сетевых объединений технологических компаний, как основы мультиагентной модели распределения ресурсов в процессе реализации инновационных разработок в сетевых объединениях технологических компаний. В ходе работы приводится описание стратегий взаимодействия агентов в мультиагентных системах на примере взаимодействия внутренних агентов сетевых объединений технологических компаний, а также советующий им набор убеждений, желаний и намерений.

Материалы и методы

В контексте данного исследования сетевые объединения технологических компаний приравниваются к сетевым инновационным структурам и технологическим альянсам, при этом технологические кластеры будут входить в это множество, но составлять его ограниченную часть за счет требования к территориальной близости компаний, не являющимся ограничивающим фактором в рамках данного исследования.

Исследователи выделяют следующие типы связи в объединениях технологических компаний: научно-исследовательские организации – технологические компании, технологические компании – технологические компании (партнерство, слияние, поглощение), технологические компании – венчурные компании – научно-образовательные организации, технологические компании – технологические компании

в рамках одной цепочки создания ценности [12-17]. В рамках исследования рассматриваются объединения технологических компаний, относящихся к типу связи технологические компании – технологические компании (партнерство). Для сетевых объединений технологических компаний характерны: принцип справедливости распределения ответственности и вознаграждения; совместное планирование и выбор технологий; внутреннее обучение.

Описание взаимодействия агентов (отдельных компаний/обособленных элементов сети) и их стратегии в распределенной организационной системе сетевых объединений технологических компаний в процессе ведения инновационной деятельности удобно моделировать с использованием мультиагентного подхода. Особенностью мультиагентного подхода является описание системы в виде независимых интеллектуальных агентов, обладающих собственными целями [18-20]. Каждый из этих агентов обладает способностью воспринимать окружающую среду и адаптироваться к ее изменениям. В мультиагентной системе агенты общаются друг с другом, что позволяет перейти от локальной оптимизации для одного агента к глобальной оптимизации для всей системы [18, 19]. Это значит, что при моделировании производственной системы управляющее воздействие будет рассчитываться не только на основании одного критерия оптимизации (например, экономии ресурсов), но и в соответствии со всеми другими локальными целями (например, сокращением времени производства, увеличением объема производства, увеличением прибыли) и ограничениями (по ресурсам, времени, выполнению контрактованных обязательств).

Несмотря на то, что мультиагентные системы разрабатывались для управления реальными объектами, в частности, робототехническими комплексами [4], мультиагентный подход стали применять для моделирования сложных организационных систем, в которых элементы системы могут быть представлены как интеллектуальные агенты. Так, мультиагентный подход уже зарекомендовал себя, как эффективный инструмент моделирования взаимодействий в сложных организационных системах, в частности для решения задач составления производственных расписаний [18, 19], управление ресурсами [19, 21] и моделирования социальных процессов [22-24].

Использование мультиагентного подхода в рамках решаемой задачи обусловлено необходимостью рассматривать участников сети одновременно и как обособленных агентов, стремящихся к удовлетворению собственных индивидуальных целей, так и как часть динамической системы, в которой успешность реализации инновационного потенциала зависит от способности агентов работать сообща.

Основным инструментом реализации модели является теория игр. Теория игр является оптимальным инструментом моделирования стратегических взаимодействий нескольких агентов. В контексте решаемой задачи теория игр является основным инструментом описания набора стратегических взаимодействий сетевых объединений технологических компаний

в процессе ведения инновационно-технологической деятельности и их последователей.

В рамках МАС инструменты теории игр решают такие задачи, как формализация конфликта в виде игровой модели, формализация взаимодействия игроков, формализация стратегий игроков с указанием математических свойств множества стратегий для каждого игрока, определение ситуации игры, с учетом найденных решений в предыдущих задачах [25-28]. Методы теории игр используются для моделирования стратегических взаимодействий игроков, поиска оптимального решения (равновесия Нэша), разработки механизмов координации и коллективного поведения при коалиционных ситуациях и моделирования в условиях неопределенности.

Более того, инструменты теории игр уже успешно применяются для моделирования взаимодействий в рамках инновационной деятельности компаний, в частности для расчета влияния конкуренции на выигрыш от ведения инновационной деятельности, проникновения предприятия на новый рынок, выбора ценовой стратегии, расчета времени разработки новой продукции или распределения выигрыша от ведения инновационной деятельности [29].

Предполагается, что симбиоз теории игр и мультиагентного подхода в контексте решаемой задачи позволит получить новые инструменты исследования децентрализованных организационных систем, сохраняя преимущества интеллектуальных подходов, основанных на машинном обучении, и гибкость имитационного моделирования.

Результаты

Рассматривая объект исследования как мультиагентную систему, необходимо выделить релевантные парадигмы взаимодействия агентов, характерные как для сложных организационных систем, так и для мультиагентных систем в целом [18, 30, 31]. На основании анализа международного опыта моделирования мультиагентных взаимодействий были выделены следующие типы взаимодействий: кооперация, конкуренция и коопетиция [18, 30, 31]. Определим суть стратегий в контексте решаемой задачи.

Кооперация означает, что агенты работают вместе для достижения общей цели, обмениваясь информацией и ресурсами. В такой парадигме агенты будут обладать равными правами на ресурсы, поэтому успех стратегии будет зависеть от степени кооперации. Так, в контексте решаемой задачи, при кооперации компании будут реализовать разработку инновационных продуктов совместно, а ресурсы будут распределяться последовательно по проектам портфеля в зависимости от расчетных значений эффективности, основанной на оценке комплексного показателя ценности разрабатываемых инновационных продуктов и затрат на их реализацию. По данному принципу работают инновационно-технологические альянсы, например НПА «Сфера».

Конкуренция означает, что агенты будут конкурировать за ресурсы. Это значит, что при распределении

ресурсов один агент будет получать больше ресурсов, что повысит его шансы на успешную реализацию проекта, но может негативно сказаться на других проектах, как минимум в части сроков реализации. С точки зрения разрабатываемого алгоритма логика распределения ресурсов будет схожей — ресурсы будут распределяться в зависимости от расчетных значений эффективности, однако, распределение будет одновременным и адресованным к производственной площадке (компании сети), а не проекту. Данная стратегия характерна для сетевых компаний, образовавшихся за счет расширения и формирования дочерних подразделений (ПАО «Газпром»).

Коопетиция означает, что агенты могут как конкурировать, так и кооперироваться друг с другом, при этом они могут легко переходить от конкуренции к кооперации, и наоборот. Эта стратегия наиболее приближена к рыночным взаимоотношениям и характерна для компаний с гибким управлением и перекрестными связями на одном уровне иерархии организационной системы. В разрабатываемой системе каждая площадка априори будет претендовать на равный пул ресурсов. Однако, после сопоставления полученных ресурсов с потребностью в ресурсах каждая площадка может отправить запрос на обмен ресурсами. Поскольку в рамках прототипа модели предполагается наличие только двух видов ресурсов, интеллектуальных и финансовых, то обмен ресурсами будет осуществляться в виде обмена ресурсами одной группы на другую. Данная стратегия предполагает, запрос на обмен ресурсами может быть отклонен. Тогда на данной производственной площадке будут проведен перерасчет показателей проекта с учетом ресурсов, находящихся в наличии.

В контексте стратегий взаимодействия агентов может быть определена внутренняя архитектура интеллектуальных агентов, как набор убеждений, желаний и намерений в соответствии с концепцией BDI (табл. 1). В терминах мультиагентного моделирования убеждения отражают знания агентов о системе, желанием представлены цели, а намерения — конкретные стратегии агента, позволяющие достигать целей с учетом знаний о системе. Таким образом: система убеждений агента определяется заранее и может быть дополнена в процессе работы системы; желания, аналогично, могут быть как предписанными, так и формироваться в процессе взаимодействия агентов друг с другом и со средой; намерения определяются в ходе моделирования на основе желаний и убеждений [31, 32].

Ключевым элементом процесса распределения ресурсов является формирование рейтинга проектов. На основании правил ранжирования проектов, совместно определяемых компаниями сети на основании голосования или экспертного мнения, реализуется рейтингование проектов [33]. В рамках данного исследования правила рейтингования представлены следующим образом:

1. Выделение проектов с коэффициентом взаимозаменяемости (I) = 1.
2. Рейтингование проектов с $I=1$ по затратам: от минимальных к максимальным;
3. Кластеризация остальных проектов по затратам.

Набор убеждений, желаний и намерений для внутренних агентов сетевых объединений технологических компаний

Элемент	Описание
Агент	$AA_{n_{ia}}$ – отдельная компания сети, i – порядковый номер сетевого объединения технологических компаний, a – порядковый номер агента – одной из компаний сети
Убеждения	1 этап. Потребность в ресурсах для реализации y -го инновационного продукта. Составляет Df_y рублей (финансовые ресурсы) и Di_y человеко-дней (интеллектуальные ресурсы). Предварительная оценка комплексного показателя ценности составляет CVI_y . Интеллектуальные ресурсы сети равны I , финансовые ресурсы равны F . 2 этап. Рейтинг проекта по реализации y -го инновационного продукта – E
Желания	Максимизация выигрыша сети от инновационных продуктов $F_{An_i} \left(\sum_{y=1}^y CVI_y \right) \rightarrow \max.$ Максимизация своего выигрыша от реализации y -го инновационного продукта $F_{Aan_i}(CVI_y) \rightarrow \max$
Намерения	1. Выбрать стратегию распределения ресурсов. 2. Уточнить стратегию распределения ресурсов. 3. Выполнить разработку инновационного продукта с учетом согласованной стратегии. Кооперация: получить рейтинг проектов; реализовать проект с самым высоким рейтингом с другими агентами; перейти к следующему проекту (до истощения ресурсов). Конкуренция: получить рейтинг проектов; получить ресурсы в соответствии с рейтингом проектов; рассчитать сроки реализации проекта на основании сопоставления потребности в ресурсах и полученных ресурсов; реализовать проект. Коопетиция: получить ресурсы; рассчитать сроки реализации проекта на основании сопоставления потребности в ресурсах и полученных ресурсов; при необходимости получить/передать интеллектуальные i_i и финансовые f_i ресурсы другим агентам; реализовать проект

4. В рамках каждого кластера сравнение проектов по прогнозным значениям комплексного показателя ценности.

5. Добавление в рейтинг проектов с самыми высокими значениями относительного комплексного показателя ценности к затратам по кластерам (от минимума к максимуму).

В рамках системы рейтингования сделано допущение о приоритетности уникальных продуктов ($I=1$). Подразумевается, что в таком случае ранжирование проектов по комплексному показателю ценности и затратам заменяется на ранжирование по коэффициенту взаимозаменяемости и затратам.

Под комплексным показателем ценности (CVI) подразумевается комплексная оценка качества разрабатываемых инновационных продуктов, основанная на параметрах воспринимаемого качества, цены и взаимозаменяемости. Параметры оценки определены авторами текущего исследования (самостоятельная разработка) на основании российских и международных стандартов оценки качества продуктов и услуг, а также предыдущих исследованиях авторов настоящего исследования [33]:

$$\text{Complex value indicator (CVI)} = \frac{\left(\frac{F+S+R+E}{Q_{\max}} \right)^{\alpha} + \left(\frac{C_{\min}}{C} \right)^{\beta} + \left(\frac{1}{m+1} \right)^{\gamma}}{3},$$

где CVI – это комплексный показатель ценности, $CVI \in [0; 1]$, безразмерная величина; C – цена продукта (cost; $C \in \mathbb{N}$), измеряется в денежных единицах; I – взаимозаменяемость (interchangeability; $I \in (0; 1]$), $I=1/(m+1)$, безразмерная величина; F – функциональность (functionality); R – ресурсоемкость (resource intensity); S – безопасность (safety); E – экологич-

ность (sustainability); Q_{\max} – максимальная оценка среди продуктов-конкурентов, измеряется в денежных единицах; m – количество конкурентов; α, β, γ – коэффициенты, отражающие значимость каждого из показателей в общей оценке.

Значения параметров качества (функциональность, ресурсоемкость, безопасность, экологичность) определяются на основании рейтинговой шкалы. Таким образом, значения показателей будут варьироваться в диапазоне от 1 до P , где P – количество продуктов-аналогов, используемых для формирования рейтинга. Параметры качества определены на основании минимальных требований к качеству продукции и услуг, представленных в стандартах «ГОСТ 15467-79, СТ СЭВ 3519-81 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения» и «ИСО» серии 9000.

С учетом архитектуры интеллектуальных агентов и выбора стратегии определяется подход к распределению ресурсов (рис. 1).

Выбор стратегии взаимодействия происходит на основании результатов предварительных расчетов с использованием теории игр. Агенты принимают решение обособленно по выбору стратегии, не зная место проекта в рейтинге. Если все агенты выбирают кооперацию, то распределение ресурсов происходит по алгоритму кооперации, после чего рассчитывается выигрыш системы и каждого агента. Аналогично происходит если все агенты выбирают конкуренцию или коопетицию – тогда аналогично агенты идут по своему алгоритму. Но, в случае если часть агентов выбрала конкуренцию, а часть – коопетицию и/или кооперацию, то агентам предлагается «передумать». На этот раз агенты принимают решения, зная место проекта в рейтинге. Соответственно, чтобы повысить свои шансы на получение ресурсов агенты могут выбрать стратегию коопетиция.

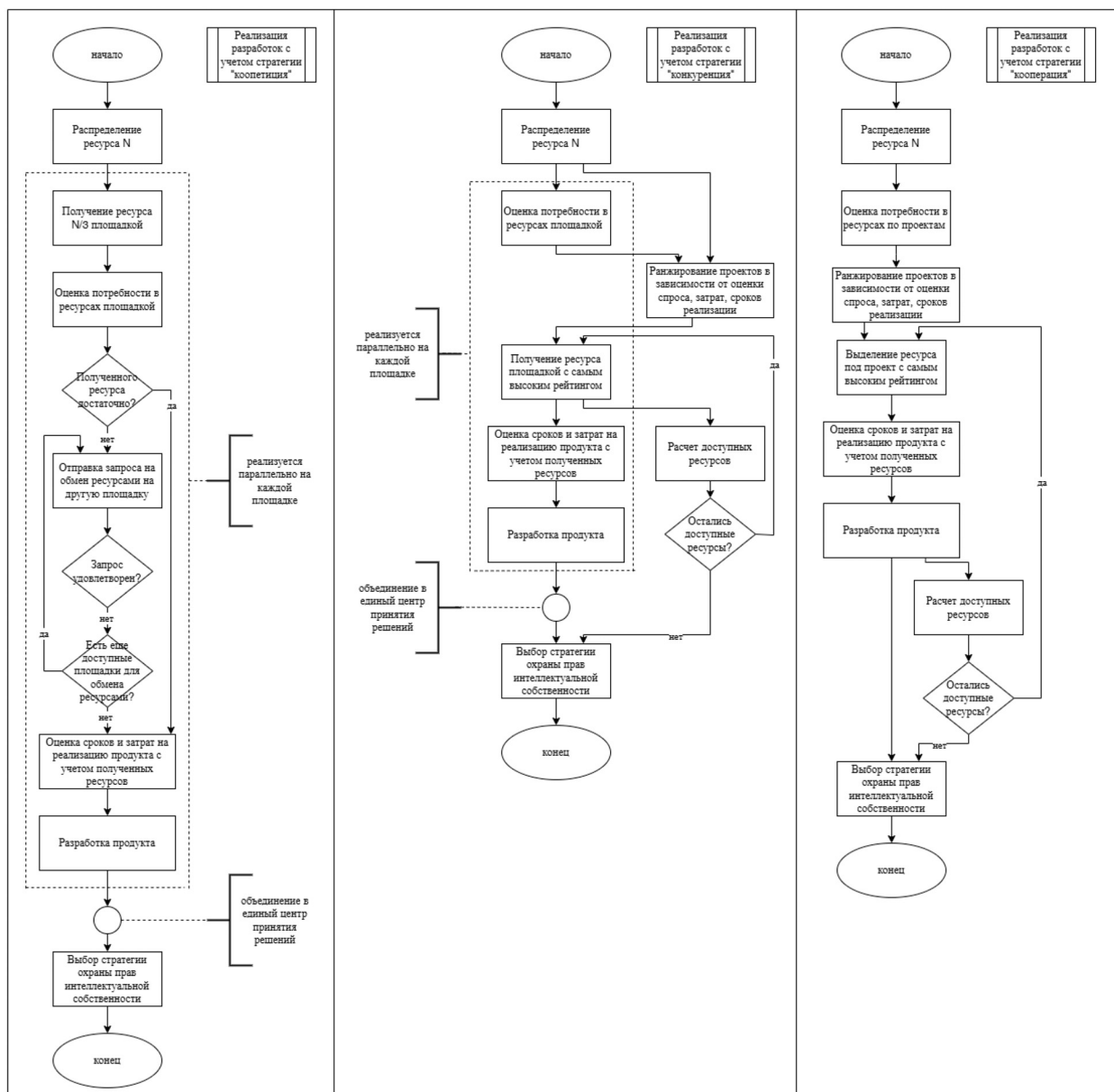


Рис. 1. Алгоритм мультиагентной модели распределения ресурсов в процессе реализации научно-технических разработок агентами сетевого объединения технологических компаний

В зависимости от выбранной стратегии взаимодействия определяется план реализации инновационных продуктов: для стратегии «кооперация» – последовательный выпуск продуктов; для стратегии «коопетиция» и «конкуренция» – параллельный выпуск продуктов с удовлетворенной потребностью в ресурсах, затем параллельный выпуск продуктов с частично удовлетворенной потребностью в ресурсах. Соответственно, рассматривая динамику поступления денежных средств от реализации инновационных продуктов, стратегия «кооперация» подразумевает быстрые финансовые результаты, но более растянутые во времени в сравнении с другими стратегиями.

Обсуждение

Результаты исследования вносят вклад в решение проблемы ограниченности существующих инструментов поддержки принятия решений по управлению

стратегиями инновационной деятельности сетевых объединений технологических компаний, не учитывающих мультиагентный характер взаимодействий элементов. Таким образом, результаты исследования, включающие алгоритмическую адаптацию стратегий взаимодействия и рекомендуемый набор убеждений, желаний и намерений для внутренних агентов сетевых объединений технологических компаний, расширяют базу методологических и инструментальных средств моделирования децентрализованных организационных систем на базе гибридного моделирования, основанного на совместном применении теории игр и мультиагентного подхода. Разработанное решение является основой системы поддержки принятия решений для формирования стратегий инновационной деятельности сетевых объединений технологических компаний, учитывающей специфические особенности сложных организационных систем.

В рамках исследования сделаны допущения, связанные с системой ранжирования проектов, а также в части случайного выбора стратегий взаимодействия. На следующем этапе исследования планируется доработка разработанной модели, в частности на основании результатов апробации модели на технологическом рынке связи 5G и непосредственной деятельности компании Huawei.

Заключение

В рамках данного исследования рассматриваются стратегии взаимодействия отдельных компаний сетевых объединений технологических компаний в процессе распределения общего пула ресурсов на реализацию инновационных продуктов и их влияние на показатели эффективности инновационной деятельности. Результатом работы является алгоритмическая адаптация стратегий взаимодействия и советующий набор убеждений, желаний и намерений для внутренних агентов

сетевых объединений технологических компаний, как основа мультиагентной модели распределения ресурсов в процессе реализации инновационных разработок в сетевых объединениях технологических компаний, позволяющей рассчитывать план реализации инновационных продуктов в соответствии параметрами стратегий. На следующем этапе исследования планируется доработка модели в части обеспечения интеллектуального выбора стратегий взаимодействия на основании анализа предшествующих расчетов и соответствующего автоматического расширения знаний агентов о системе.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-21-00322. <https://rscf.ru/project/25-21-00322>.

Список использованных источников

1. M. Schilling. Technology Shocks, Technological Collaboration, and Innovation Outcomes//Organization Science, 2015, № 26.
2. C. Dhanaraj, A. Parkhe. Orchestrating innovation networks//Academy of Management Review, 2006, № 31 (3). P. 659-669.
3. L. Shi, S. Gao, A. Xu et al. Influence of Enterprise's Factor Inputs and Co-Opetition Relationships to Its Innovation Output//Sustainability, 2023, № 15. P. 838.
4. G. Yang. Knowledge Element Relationship and Value Co-Creation in the Innovation Ecosystem//Sustainability, 2024, № 16. P. 4273.
5. J. J. Guo, F. J. Xie. The Impact of Firm's Collaboration Network Position on Innovation Performance-Based on ICT Industry//J. Syst. Manag, 2020, № 29. P. 1124-1135.
6. P. Xu, M. Zhang, M. Gui. How R&D Financial Subsidies, Regional R&D Input, and Intellectual Property Protection Affect the Sustainable Patent Output of SMEs: Evidence from China//Sustainability. 2020. № 12. P. 1207.
7. E. Bellini, C. D. Era, R. Verganti. A Design-Driven Approach for the Innovation Management within Networked Enterprises. Methodologies and Technologies for Networked Enterprises. 2012. P. 31-57.
8. E. Turkina, A. Van Assche, R. Kali. Structure and evolution of global cluster networks: evidence from the aerospace industry//Journal of Economic Geography. 2016. № 16. P. 1211-1234.
9. K. Chen, Y. Zhang, G. Zhu, R. Mu. Do research institutes benefit from their network positions in research collaboration networks with industries or/and universities. Technovation. 2020. P. 94-95.
10. Н. Н. Цибанова. Мультиагентные технологии как детерминанта функционирования сетевых промышленных предприятий на современном этапе//Вопросы инновационной экономики. 2019. № 1. С. 55-64.
11. С. Л. Парфенова. Сетевая модель организации научной деятельности//Управление наукой и наукометрия. 2014. № 16.
12. C. Sassanelli, S. Terzi. Building the Value Proposition of a Digital Innovation Hub Network to Support Ecosystem Sustainability//Sustainability. 2022. № 14. P. 11159.
13. E. Bellini, C. D. Era, R. Verganti. A Design-Driven Approach for Innovation Management within Networked Enterprises. Methodologies and Technologies for Networked Enterprises. 2012. P. 31-57.
14. D. Ye, L. Zheng, P. He. Industry Cluster Innovation Upgrading and Knowledge Evolution: A Simulation Analysis Based on Small-World Networks//SAGE Open. 2021. № 11.
15. P. Li, H. Bathelt. Location strategy in cluster networks//J Int Bus Stud. 2018. № 49. P. 967-989.
16. D. Ye, Y.J. Wu, M. Goh. Hub firm transformation and industry cluster upgrading: innovation network perspective//Management Decision. 2020. № 58. P. 1425-1448.
17. E. Turkina, A. Van Assche. Global connectedness and local innovation in industrial clusters//J Int Bus Stud. 2018 № 49. P. 706-728.
18. Г. А. Ржевский, П. О. Скобелев. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями/Пер. с англ. Самара: Офорт, 2015. 290 с.
19. V. I. Gorodetsky, S. S. Kozhevnikov, D. Novichkov, P. O. Skobelev. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multi-agent Systems for Adaptive Resource Management. Lecture Notes in Computer Science, 2019. P. 52-64.
20. M. J. Wooldridge. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons Publ., Chichester, UK, 2009. P. 461.
21. P. Skobelev. Multi-agent systems for real time resource allocation, scheduling, optimization and controlling: Industrial applications. Lecture Notes in Computer Science, 2011. P. 1-14.
22. N. R. Jennings. Specification and Implementation of a Belief-Desire-Joint-Intention Architecture for Collaborative Problem Solving//International Journal of Cooperative Information Systems. 1993. № 2. P. 289-318.
23. О. Р. Магомедов. Мультиагентная система поддержки принятия решений для минимизации стоимости группируемых товаров//Вестник Российского нового университета. Серия: «Сложные системы: модели, анализ и управление». 2022. № 4. P. 97-107.
24. А. Н. Швецов. Проектирование мультиагентной системы разрешения межфункциональных конфликтов на предприятии//Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 1. P. 74-89.
25. M. Weerd, B. Clement. Introduction to planning in multiagent systems//Multiagent and Grid Systems. 2009. № 5. P. 345-355.
26. L. de Silva, F. Meneguzzi, B. Logan. An Operational Semantics for a Fragment of PRS//Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence Main track. 2018. P. 195-202.
27. M. Georgeff, B. Pell, M. Pollack et al. The Belief-Desire-Intention Model of Agency. Lecture Notes in Computer Science, 1970. P. 1-10.
28. P. S. Rosenbloom, J. E. Laird, J. McDermott et al. R1-soar: an experiment in knowledge-intensive programming in a problem-solving architecture//IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 1985. № 7. P. 561-569.
29. Г. Ю. Силкина. Теоретико-игровое моделирование взаимодействия субъектов в инновационной сфере//economy. 2012. № 2.
30. H. Abbas, S. Shaheen, M. Amin. Organization of Multi-Agent Systems: An Overview//International Journal of Intelligent Information Systems, 2015.
31. P. A. Sharko, Z. V. Burlutskaya, D. A. Zubkova et al. AI-Supported Decision Making in Multi-Agent Production Systems Using the Example of the Oil and Gas Industry//Applied Sciences. 2025. № 15 (10). P. 5366.
32. A. S. Rao. AgentSpeak(L): BDI agents speak out in a logical computable language//Lecture Notes in Computer Science. 1996. № 1038. P. 42-55.
33. M. V. Bolsunovskaya, A. M. Gintciak, Zh. V. Burlutskaya et al. Complex Method of the Consumer Value Estimation on the Way to Risk-Free and Sustainable Production//Sustainability. 2023. Vol. 15. № 2. P. 1273.

References

1. M. Schilling. Technology Shocks, Technological Collaboration, and Innovation Outcomes//Organization Science, 2015, № 26.
2. C. Dhanaraj, A. Parkhe. Orchestrating innovation networks//Academy of Management Review, 2006, № 31 (3). P. 659-669.
3. L. Shi, S. Gao, A. Xu et al. Influence of Enterprise's Factor Inputs and Co-Opetition Relationships to Its Innovation Output//Sustainability, 2023, № 15. P. 838.
4. G. Yang. Knowledge Element Relationship and Value Co-Creation in the Innovation Ecosystem//Sustainability, 2024, № 16. P. 4273.
5. J. J. Guo, F. J. Xie. The Impact of Firm's Collaboration Network Position on Innovation Performance-Based on ICT Industry//J. Syst. Manag, 2020, № 29. P. 1124-1135.
6. P. Xu, M. Zhang, M. Gui. How R&D Financial Subsidies, Regional R&D Input, and Intellectual Property Protection Affect the Sustainable Patent Output of SMEs: Evidence from China//Sustainability. 2020. № 12. P. 1207.
7. E. Bellini, C. D. Era, R. Verganti. A Design-Driven Approach for the Innovation Management within Networked Enterprises. Methodologies and Technologies for Networked Enterprises. 2012. P. 31-57.
8. E. Turkina, A. Van Assche, R. Kali. Structure and evolution of global cluster networks: evidence from the aerospace industry//Journal of Economic Geography. 2016. № 16. P. 1211-1234.
9. K. Chen, Y. Zhang, G. Zhu, R. Mu. Do research institutes benefit from their network positions in research collaboration networks with industries or/and universities. Technovation. 2020. P. 94-95.
10. N. N. Tsibanova. Multi-agent technology as a determinant of the functioning of the network of industrial enterprises at the present stage//Russian journal of innovation economics. 2019. № 1. P. 55-64.
11. S. L. Parfenova. Network model of the organization of scientific activity//Science Governance and Scientometrics. 2014. № 16.
12. C. Sassanelli, S. Terzi. Building the Value Proposition of a Digital Innovation Hub Network to Support Ecosystem Sustainability//Sustainability. 2022. № 14. P. 11159.
13. E. Bellini, C. D. Era, R. Verganti. A Design-Driven Approach for Innovation Management within Networked Enterprises. Methodologies and Technologies for Networked Enterprises. 2012. P. 31-57.
14. D. Ye, L. Zheng, P. He. Industry Cluster Innovation Upgrading and Knowledge Evolution: A Simulation Analysis Based on Small-World Networks//SAGE Open. 2021. № 11.
15. P. Li, H. Bathelt. Location strategy in cluster networks//J Int Bus Stud. 2018. № 49. P. 967-989.
16. D. Ye, Y.J. Wu, M. Goh. Hub firm transformation and industry cluster upgrading: innovation network perspective//Management Decision. 2020. № 58. P. 1425-1448.
17. E. Turkina, A. Van Assche. Global connectedness and local innovation in industrial clusters//J Int Bus Stud. 2018 № 49. P. 706-728.
18. G. A. Rzevski, P. O. Skobelev. Managing Complexity. Southampton: WIT Press, 2015. 290 p.
19. V. I. Gorodetsky, S. S. Kozhevnikov, D. Novichkov, P. O. Skobelev. The Framework for Designing Autonomous Cyber-Physical Multi-agent Systems for Adaptive Resource Management. Lecture Notes in Computer Science, 2019. P. 52-64.
20. M. J. Wooldridge. An Introduction to Multiagent Systems. John Wiley & Sons Publ., Chichester, UK, 2009. P. 461.
21. P. Skobelev. Multi-agent systems for real time resource allocation, scheduling, optimization and controlling: Industrial applications. Lecture Notes in Computer Science, 2011. P. 1-14.
22. N. R. Jennings. Specification and Implementation of a Belief-Desire-Joint-Intention Architecture for Collaborative Problem Solving//International Journal of Cooperative Information Systems. 1993. № 2. P. 289-318.
23. O. R. Magomedov. Multi-agent decision support system for minimizing the cost of grouped goods//Vestnik rosnou complex systems models analysis management. 2022. № 4. P. 97-107.
24. A. N. Shvetcov. Designing a multi-agent system for resolving interfunctional conflicts in an enterprise //Cherepovets state university bulletin. 2022. № 1. P. 74-89.
25. M. Weerd, B. Clement. Introduction to planning in multiagent systems//Multiagent and Grid Systems. 2009. № 5. P. 345-355.
26. L. de Silva, F. Meneguzzi, B. Logan. An Operational Semantics for a Fragment of PRS//Proceedings of the Twenty-Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence Main track. 2018. P. 195-202.
27. M. Georgeff, B. Pell, M. Pollack et al. The Belief-Desire-Intention Model of Agency. Lecture Notes in Computer Science, 1970. P. 1-10.
28. P. S. Rosenbloom, J. E. Laird, J. McDermott et al. R1-soar: an experiment in knowledge-intensive programming in a problem-solving architecture//IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell. 1985. № 7. P. 561-569.
29. G. Y. Silkina. Teoretiko-igrovoemodelirovanie vzaimodeystviya subektov v innovatsionnoy sfere//Ѡ-economy. 2012. № 2.
30. H. Abbas, S. Shaheen, M. Amin. Organization of Multi-Agent Systems: An Overview//International Journal of Intelligent Information Systems, 2015.
31. P. A. Sharko, Z. V. Burlutskaya, D. A. Zubkova et al. AI-Supported Decision Making in Multi-Agent Production Systems Using the Example of the Oil and Gas Industry//Applied Sciences. 2025. № 15 (10). P. 5366.
32. A. S. Rao. AgentSpeak(L): BDI agents speak out in a logical computable language//Lecture Notes in Computer Science. 1996. № 1038. P. 42-55.
33. M. V. Bolsunovskaya, A. M. Gintciak, Zh. V. Burlutskaya et al. Complex Method of the Consumer Value Estimation on the Way to Risk-Free and Sustainable Production//Sustainability. 2023. Vol. 15. № 2. P. 1273.