

Отзыв

члена диссертационного совета Седакова Артема Александровича на диссертацию Королева Алексея Васильевича на тему: «Математические модели управления в экономических системах с сетевой структурой», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 01.01.09 – Дискретная математика и математическая кибернетика

Актуальность темы исследования. Во многих реальных примерах конфликтов тезис о «глобальном» взаимодействии сторон не находит своего подтверждения. Другими словами далеко не всегда есть основания полагать, что любая совокупность участников способна взаимодействовать друг с другом без каких-либо ограничений. Напротив, подобное взаимодействие скорее является «локальным», или ограниченным, по ряду естественных причин: географическим, политическим, экономическим, социальным и пр. Таким образом, изучение управляемых процессов и их понимание при ограниченном взаимодействии участников является не только естественным, но и актуальным. Для формализации конфликтных ситуаций с ограничениями на взаимодействие участников используется теоретико-игровое моделирование на сетях. Сеть является довольно удачным объектом, описывающим существующие ограничения — ее узлы идентифицируются с участниками, а ребра отражают структуру их взаимодействия в анализируемой ситуации. Для поиска приемлемого поведения участников применяются инструменты теории игр.

В работе исследуются математические модели управления в экономических системах с сетевой структурой: модели общественных благ с экстерналиями, модели конфликтного и скоординированного управления в маркетинговых сетях (в том числе, с заданной иерархией сторон конфликта). В то же время в диссертации исследуются вопросы слияния нескольких сетей в одну. Все это говорит не только об актуальности исследования, но также подчеркивает и его прикладную направленность.

Научная новизна. Полученные в диссертации результаты являются новыми и, безусловно, представляют научный интерес. Они дополняют и обобщают некоторые известные теоретические результаты, в частности, применительно к рассматриваемым мерам центральности, экономическим моделям и сетевым моделям с экстерналиями.

Степень достоверности. Изложенные в диссертации теоретические результаты приводятся с полными и строгими доказательствами. В случае необходимости приводятся ссылки на источники используемых утверждений. Работа, в целом, выполнена на высоком математическом уровне.

Основные результаты диссертации опубликованы в профильных научных изданиях, в частности, таких как «Автоматика и телемеханика», «Математическая теория игр и ее приложения», *Frontiers of Dynamic Games*, *International Journal of Engineering Business Management*; они представлялись на международных научных конференциях высокого уровня по теории игр, оптимизации, исследованию операций и теории сетей. Результаты диссертации также обсуждались на семинаре по теории игр в Санкт-Петербургском государственном университете в 2020 г.

Теоретическая и практическая значимость работы. Работа имеет важное значение для развития теоретико-игрового моделирования на сетях. Результаты диссертации вносят особый вклад в понимание процессов, протекающих в ряде центральных моделей кон-

фликтной природы (статических и динамических) и позволяют использовать эти результаты при анализе практических ситуаций: модели динамики мнений и поиск консенсуса, модели предоставления общественных благ и анализ экстерналий. Результаты также развивают многие известные модели статических и динамических экономических систем, в частности, путем учета человеческого капитала переменной природы.

Содержание работы. Диссертация посвящена исследованию математических моделей управления в экономических системах с сетевой структурой. Она состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 506 страниц.

В первой главе анализируются типологии сетей и меры центральности вершин. Вводится $\alpha\gamma$ -центральность вершины, изучается связь типологии вершины и центральности. Установлено, что для определения центральности вершины можно использовать матрицу смежности типов вместо классической матрицы смежности. Далее анализируется ряд статических и динамических моделей экономических систем: статическая природоохранная модель с использованием теории контрактов, популяционные модели на примере модели Лотки–Вольтерра, динамическая модель ценообразования финансовых опционов, динамические модели эндогенного роста, в том числе пространственные — на прямой и на окружности.

Во второй главе подробно анализируется теоретико-игровая сетевая модель с производством и экстерналиями на основе двухпериодной модели Ромера с квадратичными функциями выигрыша. Вводится понятие равновесия Нэша с экстерналиями, а после нахождения такого равновесия в рассматриваемой модели проводится его подробный анализ, выделяя три возможных типа агентов в сети: пассивных, активных и гиперактивных.

В третьей главе делается переход к динамической сетевой модели с производством и экстерналиями для анализа равновесия в игре с переходной динамикой, которая анализируется отдельно в дискретном и непрерывном времени. Ввиду динамической постановки найденное равновесие также анализируется на предмет устойчивости — способности вернуть состояние сети в исходное равновесие при малом отклонении одного или нескольких агентов от равновесного поведения. Модель анализируется также и в стохастической постановке при случайной продуктивности агентов, состоящей из детерминированной и винеровской составляющих. В этой главе также исследуются вопросы объединения сетей.

В четвертой главе исследуются теоретико-игровые модели управления мнениями на ориентированных графах. Решается задача поиска равновесного (в смысле Нэша) и кооперативного (совместного) управления в статической модели управления мнениями при однократном воздействии на начальные мнения агентов и в динамической модели, допускающей возможность воздействия на мнений в каждый момент времени. В динамической постановке рассматривается также иерархическая схема управления мнениями на сетях и приводится решение (в смысле Штакельберга), учитывающее наличие разных уровней иерархии.

В пятой главе динамические теоретико-игровые модели управления мнениями дополняются вводом фазовых ограничений. Такие модели подробно исследуются лишь в иерархической постановке для стохастических справа и стохастических слева матриц влияния отдельно для дискретного и непрерывного времени.

Замечания. По оформлению и содержанию диссертации, в целом, нет существенных недостатков, которые могли бы негативно повлиять на общее впечатление от работы. Однако, имеются некоторые замечания:

1. Материал первой главы диссертации стоило изложить иным образом, опустив ряд довольно объемных разделов без существенной потери качества и связности. Представленные в разделах 1.2–1.5 результаты о мерах центральности относятся к теории графов, и вместе с анализом типологии сетей более уместно смотрелись бы в виде вводной части ко второй главе диссертации, где обсуждаются теоретико-игровые сетевые модели с производством и экстерналиями. Результаты разделов 1.6–1.7, полученные для ряда статических и динамических экономических систем, в том числе пространственных, на мой взгляд, не близки к моделям с сетевой структурой, обсуждаемым в последующих главах, и общей теме диссертации.
2. Для некоторых моделей экономических систем из раздела 1.7 не всегда основные результаты формулируются в виде формальных утверждений. В моделях из разделов 1.7.1–1.7.3 величины $N(t)$, $N_i(t)$ обозначают объемы определенных популяций, количество работников и, по своему смыслу, носят дискретный характер, поэтому переход к относительным величинам был бы, на мой взгляд, более оправдан при изучении рассматриваемой динамики.
3. При исследовании теоретико-игровой модели с производством и экстерналиями в главе 2 равновесное поведение довольно подробно анализируется с точки зрения структуры равновесия (внутреннее или чисто угловое) и структуры сети (регулярные сети, включая диады и триады). В то же время исследование не обсуждает общий случай неоднородности агентов, ограничиваясь неоднородностью частного характера — агентами с разной продуктивностью, но с одинаковыми начальными запасами финального блага e и одинаковыми коэффициентами насыщения a в их функциях полезности. Рассмотрение модели более общего вида, несомненно, может существенно изменить структуру равновесия и затруднить его поиск, но с другой стороны, возможно, сохранит ряд свойств равновесий, которые находят свое отражение в анализируемом случае.
4. Часто D_i , с одной стороны, фигурирует в условиях первого порядка, а с другой — подразумевается числом, которое определяется методом неопределенных коэффициентов путем решения системы разностных уравнений.
5. В третьей главе при анализе равновесия обсуждаются специальные случаи: сети с двумя типами агентов, би- и трирегулярные сети и пр. Мотивация выбора сетей такого типа не аргументируется какими-либо экономическими или социальными предпосылками и не подкреплена статистическими данными.
6. В разделах 4.2–4.3 при анализе динамической игры управления мнениями на сетях последовательно анализируются конечношаговые модели в дискретном и непрерывном времени. В идейном плане две модели идентичны, однако в математической постановке уравнения динамики заметно различаются в части влияния управления на изменение мнений агентов (линейное против нелинейного). Подобный комментарий справедлив и для моделей, представленных в разделах 4.4–4.5, в части незначительных различий в функциях выигрыша игроков. В тексте необходимость таких различий не обсуждается. Более того, различие в моделях затрудняет проведение полноценного сравнительного анализа решений отдельно для моделей в дискрет-

ном времени и в непрерывном, а также поиска общих эффектов или, наоборот, свойственных лишь определенным моделям.

7. Главы 4 и 5 диссертации, в целом, посвящены анализу одной модели. Несмотря на отмеченные выше различия, некоторые разделы этих глав анализируют одну и ту же модель в разных ее вариациях. Например, согласуются постановки иерархических моделей. По этой причине стоило уделить внимание более глубокому анализу полученных результатов, не ограничиваясь лишь поиском аналитического решения. Например, был бы весьма интересен анализ, по крайней мере, следующих трех проблем: степени влияния фазовых ограничений на поведение как центра, так и подчиненных ему участников, влияние фазовых ограничений на мнения агентов и сравнение индекса системной согласованности в моделях с фазовыми ограничениями и без таковых.
8. В рамках поиска равновесного поведения в главе 5 необходимо отметить, почему фазовые ограничения не присутствуют в уравнении Гамильтона–Якоби–Беллмана. Схема поиска равновесия построена следующим образом: сначала находятся управления агентов нижнего уровня безотносительно фазовых ограничений (вид стратегий не зависит от x_* и x^*), а далее уже при поиске управления центра фазовые ограничения принимаются во внимание. Правомерность такого подхода следовало обсудить в работе.

Отмеченные замечания не влияют на общее положительное впечатление о диссертации, которая, как уже было отмечено выше, выполнена на высоком математическом уровне. Частично замечания носят редакционный характер. В то же время некоторые замечания могут быть учтены и использованы автором диссертации в будущем.

Заключение. Диссертация содержит результаты, совокупность которых может быть квалифицирована как научное достижение в области математического моделирования в экономических системах с сетевой структурой.

Диссертация Королева Алексея Васильевича на тему: «Математические модели управления в экономических системах с сетевой структурой» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Королев Алексей Васильевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 01.01.09 – Дискретная математика и математическая кибернетика. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор Кафедры математической теории игр
и статистических решений Санкт-Петербургского
государственного университета


А. А. Седаков

28 декабря 2021 г.