

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С СЕТЕВОЙ СТРУКТУРОЙ: МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ

О.И. Горбанёва

*Южный федеральный университет,
Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича*
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а
E-mail: gorbaneva@mail.ru

С.С. Михалкович

*Южный федеральный университет,
Институт математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича*
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а
E-mail: miks@sfedu.ru

А.Д. Мурзин

Южный федеральный университет, Факультет управления
Россия, 344090, Ростов-на-Дону, ул. Стачки, 201/1
E-mail: admurzin@mail.ru

Ключевые слова: экономические системы, активная сеть, устойчивое развитие.

Аннотация: Данная работа посвящена исследованию экономических систем, в основе которых лежит сетевая структура. Структура системы представлена в виде иерархической активной сети, в которой верхний уровень управляет системой при помощи административных и экономических механизмов. Система характеризуется некоторыми параметрами состояний, для совокупности которых определено множество тех из них, которые благоприятствуют её развитию. Это множество называется множеством устойчивого развития системы. Главная цель управления верхнего уровня – привести параметры состояния системы к таким значениям, при которых выполняются условия устойчивого развития. Если это удаётся (или в случае, если параметры системы и без действий верхнего уровня находятся в пределах множества устойчивого развития), то дальнейшая цель Центра – сохранить параметры системы в вышеуказанных пределах.

1. Введение

Экономические системы с сетевой структурой можно представить в виде иерархической активной сети. Элементами нижнего уровня являются активные агенты, связанные между собой и имеющие возможность влияния на поведение и выигрыши друг друга. Верхний уровень включает дополнительные вершины без входных дуг, из которых выходят дуги к некоторым агентам нижнего уровня. Выходные дуги этих вершин отражают воздействие Центра на агентов нижнего уровня. Воздействуя на них, Центр управляет системой при помощи административных и экономических механизмов.

Система характеризуется несколькими параметрами состояний. Значения параметров принадлежат определённому множеству, следовательно, в каждый момент

времени набор значений параметров принадлежит декартову произведению допустимых множеств каждого из параметров. В нём можно выделить подмножество тех точек, для которых реализуется устойчивое развитие системы. Условия, определяющие это множество, называются условиями устойчивого развития системы. Главная цель управления верхнего уровня – сделать так, чтобы параметры системы всегда удовлетворяли условиям устойчивого развития. Возможно, что на момент начала прогнозирования система уже удовлетворяет данным условиям. Тогда цель верхнего уровня состоит в удержании параметров системы в пределах этих условий.

2. Обзор источников

Имеется несколько работ, рассматривающих задачи устойчивого развития на иерархических активных сетях. Они формулируются в виде иерархических дифференциальных или разностных игр, в которых находятся равновесие по Нэшу для участников нижнего уровня, равновесие по Штакельбергу, Парето-оптимальное решение. В некоторых работах оценивается сравнительная предпочтительность соответствующих данным равновесиям регламентов игры для всех участников, а именно, равноправия, иерархии и кооперации.

В [1] Королёв А.В. рассматривал структуру, представляемую в виде активной иерархической сети, в каждом узле которой экономические процессы описываются простой двухпериодной моделью эндогенного роста Ромера с внешними эффектами производства и знаний. Для каждой вершины сумма уровней знаний в соседних узлах влияет на уровень её знаний. В статье находятся внутренние равновесия в описанной игре, а именно равновесные уровни знаний для вершин различных типологий.

В [2] авторы вводят в модель сетевых игр с производством и экстерналиями знаний, рассмотренную ранее, стохастические параметры. Тем самым обобщается двухпериодная модель Ромера. Агенты различаются продуктивностью, имеющей детерминированную и винеровскую составляющие. Рассматривается динамика, которая возникает при объединении двух полных сетей. Получены явные выражения в форме броуновских случайных процессов. Проведен качественный анализ решения системы стохастических уравнений.

В [3-7] Королёв А.В., Угольницкий Г.А. и Агиева М.Т. рассматривают динамические игры на активной социальной сети, где узлы сети являются представителями маркетинга. Агенты нижнего уровня в рассматриваемой сети имеют мнение о некотором товаре, распространяемом маркетинговой сетью. Цель агентов верхнего уровня – продать товар, а значит, повысить мнение агентов нижнего уровня о товаре. Мнение агентов нижнего уровня о товаре может изменяться под влиянием других агентов того же уровня («сарафанное радио», отзывы и т.д.). Но и агенты верхнего уровня также могут повышать в лучшую сторону мнение агентов нижнего уровня о товаре при помощи определённых действий (реклама, акции, скидки и т.д.). В работе авторы определяют сильные подгруппы среди агентов нижнего уровня и спутников. Предложен алгоритм расчёта окончательных мнений, основная идея которого заключается в том, что все усилия по контролю в маркетинге должны быть направлены только на членов сильных подгрупп, потому что они и только они определяют конечные мнения всех участников сети. Исходя из этой идеи, изучаются две проблемы контроля мнений в сетях. Во-первых, статическая игра в обычной форме, в которой игроки максимизируют конечные мнения всех членов целевой аудитории посредством маркетингового воздействия на первоначальные мнения некоторых членов сильных подгрупп. Во-вторых, разностная игра в стандартной форме, в которой игроки решают задачу максимизации суммы мнений членов целевой аудитории с

помощью позиционных стратегий воздействия на текущие мнения членов сильных подгрупп. Авторами доказано, что рассматриваемая модель системно согласована.

В [8] Горбанёва О.И. и Агиева М.Т. модифицируют модель, рассматриваемую в [3-5], добавляя в неё частные интересы агентов влияния, которые наряду с повышением продаж товара, распространяемого сетью, имеют и другие источники дохода, которые наряду с влиянием на базовых агентов также требуют финансовых инвестиций. Доказано, что здесь в отличие от моделей, рассматриваемых в [3-5], системной согласованности нет.

В [9] Горбанёва О.И. и Угольницкий Г.А. модифицировали модель, рассматриваемую в [8], и включили в целевую функцию высшего уровня частные интересы агентов влияния. То есть, наряду с продажами товара в интересах высшего уровня, агенты реализуют и свои частные интересы. В этом случае продажи несколько падают, но целевые функции всех участников системы, в том числе и высшего уровня, растут. Следовательно, учёт частных интересов агентов влияния, несмотря на некоторое понижение продаж, благотворно сказывается на участниках системы. Также учитывается условие устойчивого развития в виде задания нижнего порога. В [10] рассмотрена несложная модель учёта мнений в виде активной маркетинговой сети, основанная на модели, рассматриваемой в [8], где стратегии агентов влияния являются обратной связью стратегий базовых агентов. Для исследования моделей использовался метод качественно репрезентативных сценариев.

В [11-12] Королёв А.В. и Угольницкий Г.А. исследуют кооперативные игры с различными характеристическими функциями на основе симметричных теоретико-игровых моделей олигополии Курно в нормальной форме. Рассматриваемая олигополия Курно учитывает затраты на «зелёное» производство. В случае линейных экологических затрат равновесия Нэша и Штакельберга, а также кооперативные решения находятся аналитически, а в случае квадратичных затрат - численно. На основе этих моделей исследуются кооперативные игры для трёх игроков с одинаковыми характеристическими функциями, вычисляются значения вектора Шепли. Проводится сравнительная характеристика значений целевых функций, полученных игроками в соответствии с различными принципами оптимальности кооперативных игр и игр в обычной форме, сравнение со случаем несетевых динамических игр, а также с результатами, полученными при решении аналогичной статической задачи. Доказано, что в целом для общества и для слабых агентов кооперация лучше равноправия, а равноправие предпочтительнее иерархии. Для сильных агентов иерархия предпочтительнее равноправия, а оно, в свою очередь, лучше кооперации.

В [13] предложена и исследована теоретико-игровая формализация механизмов управления регионами в составе макрорегиона с учётом требований устойчивого развития. Структура системы представлена в виде иерархической активной сети, в которой на нижнем уровне находятся регионы, а на верхнем уровне – макрорегион. Регионы взаимодействуют между собой финансовыми инвестициями в развитие друг друга. Учитываются экологические издержки регионов, а также возможность административного и экономического влияния макрорегиона на регионы. Для описания динамики состояния региона использована модифицированная модель Солоу. Разработаны алгоритмы нахождения равновесий Нэша в игре регионов и Штакельберга в общей игре. Выполнен качественный сравнительный анализ эффективности административного и экономического механизмов управления.

3. Математическая модель, методы исследования

В данной работе исследуется модель управления приёмной кампанией в вузы, в которой вузы могут объединяться в коалицию или образовывать иерархическую систему во главе с сильным вузом-лидером. Имеется муниципальное образование и вузы, расположенные на его территории. Вузы осуществляют подготовку специалистов по M специальностям. Студенты могут обучаться в вузе как на бюджетных местах, так и на коммерческих. Бюджетные места в вуз выделяются государством, их количество от решения руководства вуза не зависит. Количество коммерческих мест на конкретные специальности может выбирать вуз. Вуз определяет стоимость коммерческого обучения студентов по каждой специальности. Государство определяет финансовый подушевой норматив, который получает вуз за каждого бюджетного студента. Вуз также несёт расходы на обучение определённого числа студентов. Не все объявленные вузом коммерческие места могут быть востребованы абитуриентами. Спрос на коммерческие места специальности вуза прямо пропорционален будущей зарплате выпускника вуза, если он пойдёт работать по данной специальности, и противоположно пропорционален цене обучения. Специальность тем привлекательнее для абитуриентов, чем больше выпускников по ней уже работает. При выбранном периоде прогнозирования T получим следующую математическую модель, представляющую собой иерархическую игру государства и n вузов (т.е. игру $(n + 1)$ –го лица):

$$\begin{aligned}
 (1) \quad & J_0 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{0j} x_{ij}(t) \rightarrow \max \\
 & x_{ij}^B(t) \geq 0, a_{ij}^B(t) \geq 0, \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij}^B x_{ij}^B(t) \leq B, \sum_{i=1}^N x_{ij}(t) \geq x_j^{\min}, \\
 (2) \quad & \sum_{i=1}^N x_{ij}(t) \geq x_j^{\min}, \\
 (3) \quad & J_i = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M \left[a_{ij}^B x_{ij}^B(t) + a_{ij}^C x_{ij}^C(t) - c_{ij} \left(\sum_{j=1}^M x_{ij}(t) \right)^2 \right] \rightarrow \max; \\
 & x_{ij}^C(t) \geq 0, a_{ij}^C(t) \geq 0; j = 1, \dots, M, t = 1, \dots, T, \\
 & x_{ij}(t) = x_{ij}^B(t) + \min \{ x_{ij}^C(t), (\gamma_j - a_{ij}^C(t)/4)^{\alpha_j} y_{ij}(t-1) \}, \\
 & y_{ij}(t) = (1 - \kappa_{ij}) x_{ij}(t-1), y_{ij}(0) = y_{ij0}, x_{ij}(0) = x_{ij0}.
 \end{aligned}$$

Здесь N – число образовательных организаций в регионе; M – число направлений подготовки; T – период планирования (длина игры); B – годовой бюджет, $x_{ij}(t)$ – число студентов j –го направления подготовки в i –й организации в году t ; $x_{ij}^B(t)$, $x_{ij}^C(t)$ – число бюджетных и коммерческих мест соответственно по j –му направлению в i –й организации в году t ; $y_{ij}(t)$ – число выпускников j –го направления в i –й организации, работающих по специальности; x_j^{\min} – минимально допустимый выпуск по j –му направлению; a_{0j} – общественная полезность выпускника j –го направления подготовки; $a_{ij}^B(t)$ – бюджетная субсидия на одного студента j –го направления в i –й организации в году t ; $a_{ij}^C(t)$ – стоимость коммерческого обучения по j –му направлению в i –й организации в году t ; γ_{ij} – коэффициент влияния перспектив трудоустройства на желание поступления по j –му направлению в i –й организации; α_j – коэффициент эластичности спроса в зависимости от роста заработной платы по j –й специальности, κ_{ij} – доля нетрудоустроенных выпускников по j –му направлению в i –й организации; c_{ij} – коэффициент затрат i –й организации на обучение студентов j –й специальности. Соотношение (1) задаёт цель управления Центра и трактуется как максимизация общественной полезности. Соотношение (2) трактуется как условие устойчивого развития, при котором количество студентов по каждой специальности будет не меньше требуемого. Задача верхнего уровня сводится к задаче линейного программирования, в то время как задача нижнего уровня исследуется имитационно.

В результате нахождения равновесия по Штакельбергу, а также равновесия по Нэшу среди вузов, можно сделать следующие выводы. Государству следует выделять все бюджетные места по специальности тем вузам, которые обучают специалистов по

данной специальности дешевле всего, причём выделять подушевое финансирование на каждого бюджетного студента следует по себестоимости. Что же касается вузов, то им можно рекомендовать определиться, бюджетных или коммерческих студентов обучать. Если вузы выбирают обучать бюджетных студентов, то им следует распределить между собой специальности, по которым обучают студентов.

4. Заключение

В данной работе исследуется модель управления приёмной кампанией в вузы, в которой вузы могут объединяться в коалицию, могут образовывать иерархическую систему во главе с сильным вузом-лидером. Проводится сравнительная характеристика значений целевых функций, полученных вузами и государством в соответствии с различными принципами оптимальности кооперативных игр и игр в нормальной форме: равновесиями по Нэшу, по Штакельбергу и Парето-оптимальным. Исследуется изменение в поведении вузов и абитуриентов при различных способах взаимодействия вузов. Проводится сравнительная характеристика результатов анализа сетевой и несетевой моделей управления высшим образованием.

Список литературы

1. Matveenko V.D., Korolev A.V. Typology of networks and equilibria in a network game with production and knowledge externalities // *Automation and Remote Control*. 2019. Vol. 80, No. 3. P. 556-575.
2. Agieva M.T., Korolev A.V., Ougolnitsky G.A. Game theoretic models of sustainable management in marketing networks // *Contributions to Game Theory and Management*. 2020. Vol. 13. P. 24-56.
3. Agieva M.T., Korolev A.V., Ougolnitsky G.A. Modeling and simulation of impact and control in social networks // *Communications in Computer and Information Science*. 2019. Vol. 1079. P. 29-40.
4. Agieva M.T., Korolev A.V., Ougolnitsky G.A. Modeling and simulation of impact and control in social networks with application to marketing // *Mathematics*. 2020. Vol. 8, No. 9. P. 1529.
5. Agieva M.T., Korolev A.V., Ougolnitsky G.A. Static and dynamic game theoretic models of opinion control in marketing networks // *Contributions to Game Theory and Management*. 2021. Vol. 14. P. 8-19.
6. Королев А.В. Переходная динамика в сетевой игре с гетерогенными агентами: стохастический случай. *Математическая теория игр и ее приложения*. 2021. Т. 13, № 1. С. 102-129.
7. Agieva M.T., Gorbaneva O.I., Dynamic SPICE-model of resource allocation in marketing networks // *Contributions to Game Theory and Management*. 2020. Vol. 13. P. 8-23.
8. Gorbaneva O., Ougolnitsky G. Sustainability of intertwined supply networks: a game-theoretic approach // *Games*. 2022. Vol. 13, No. 3.
9. Ougolnitsky G., Gorbaneva O. Sustainable Management in Active Networks // *Mathematics*. 2022. Vol. 10. P. 2848. 10.3390/math10162848.
10. Волкова О.Н., Вологина Д.А., Королев А.В. Динамика приспособления в сетевой игре со стохастическими параметрами // *Математическая теория игр и ее приложения*. 2022. Т. 14, № 1. С. 21-48.
11. Korolev A.V., Ugolnitsky G.A. Cooperative game-theoretic models of the Cournot oligopoly // *International Game Theory Review*. 2023. Vol. 25, No. 2. P. 2350004.
12. Королёв А.В., Котова М.А., Угольницкий Г.А. Сравнение методов организации и эффективности управления в динамических моделях олигополии Курно // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2023. № 1. С. 82-105.
13. Горбанева О.И., Мурзин А.Д., Угольницкий Г.А. Динамическая СОЧИ-модель регионального развития: сравнительный анализ административных и экономических механизмов управления (на примере Южного федерального округа) // *МТИП*. 2021. Т. 13, №:1. С. 59-88.