

Численный анализ модели динамического ценообразования на услуги 5G/6G для случая олигополии на рынке телекоммуникаций

И.В. Левичев, С.А. Васильев, С.К. Канзитдинов, Д. Перес Акоста

Аннотация — В данной работе рассматривается модель динамического ценообразования на телекоммуникационном рынке 5G/6G с неполной конкуренцией и используется имитационный анализ динамического ценообразования на услуги 5G/6G в условиях олигополии в телекоммуникационной отрасли. Рассмотрено ценообразование на сетевые услуги в телекоммуникациях 5G/6G с многопериодной моделью диффузии технологий. Исследуется временной путь спроса на рынке телекоммуникаций 5G/6G, динамика цен, социальный излишек и прибыль компаний при внедрении телекоммуникационными компаниями новых технологий. Исследована взаимосвязь между пользователями, телекоммуникационными компаниями и стоимостью телекоммуникационных услуг для новых технологий 5G/6G. Рассматривается равновесие телекоммуникационной отрасли при свободном входе и выходе с рынка телекоммуникаций. Исследована оптимальная многопериодная динамика прибыли телекоммуникационных компаний для случая, когда компании внедряют инновации 5G/6G с помощью исследований и разработок (Research and development, R&D). Мы анализируем затраты на R&D в области услуг и инновационный процесс технологии 5G/6G, предполагая, что телекоммуникационные компании, выполняющие R&D, различны. Мы строим и исследуем многопериодную модель диффузии технологии 5G/6G на рынке телекоммуникаций, а также исследуем стабильность этого процесса в зависимости от количества компаний, присутствующих на рынке.

Статья получена 15 ноября 2023.

Левичев Игорь Владимирович, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, аспирант кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, ORCID: 0000-0002-8566-9461 (levichev-iv.rudn@mail.ru).

Васильев Сергей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, доцент кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, ORCID: 0000-0003-1562-0256 (vasilyev-sa@rudn.ru).

Канзитдинов Шахмурад Канзитдинович, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, аспирант кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, ORCID: 0000-0002-3972-7739 (shahkanzitdinov@mail.ru).

Перес Акоста Даниэль, Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, аспирант кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, ORCID: 0000-0003-4937-1796 (peresacostadaniel@mail.ru).

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН (получатель С.А.Васильев, разработка математической модели, реализация численной схемы, проведение численного анализа).

Ключевые слова — динамическое ценообразование, олигополия в телекоммуникационной отрасли, телекоммуникации 5G/6G, R&D, многопериодическая диффузионная модель в экономике

I. ВВЕДЕНИЕ

Исследования и разработки (Research and development, R&D) в области телекоммуникаций являются определяющими при внедрении новых технологий, особенно в телекоммуникационной отрасли. В ближайшее время сети 5G/6G станут неотъемлемой частью инфраструктуры цифровой экономики. Необходимо отметить, что внедрение сетей 5G/6G требует большого количества исследований [2], [4], [21], [25], [26], так как использование спектра радиочастот, связь на миллиметровых волнах (mmWave), интегрированный доступ к Интернету вещей (IoT), большие данные (Big Data), облачные вычисления (Cloud Computing) и многие другие прорывные технологии в области телекоммуникаций очень сложны при их технической реализации и в целях оптимизации ресурсов требуется применение моделей теории массового обслуживания [1], [9], [24] и экономических моделей [7], [8], [11]- [14], [16], [18].

Анализ телекоммуникационной отрасли за последние два десятилетия играет важную роль при реализации государственной политики в области связи [10], [13], [14], [17], [18]. На основании директивы по телекоммуникациям о доступе к сетям связи и взаимосвязях телекоммуникационные услуги были сформированы новые рынки связи в большинстве стран мира. Технологические сдвиги на рынках связи дают возможность телекоммуникационным компаниям внедрять новые сервисы и, как следствие, это приводит к асимметрии между сервисами разных компаниями. Некоторые компании активно внедряют новые технологии и являются технологическими лидерами рынка связи, а другие компании приступают к внедрению новых технологий с некоторым опозданием. Но необходимо отметить, что компании-лидеры, который раньше других внедряют новые технологии на телекоммуникационном рынке, имеет дополнительное рыночное преимущество и рыночную власть из-за надежности и репутации качества сервисов.

Также необходимо отметить, что технологические сдвиги на рынке телекоммуникаций требуют проведения детального анализа внедрения новых технологий,

включая R&D [15], [19]. В области R&D П. Дасгупта, Дж. Стиглиц [5] рассматривают факторы, определяющие расходы на R&D, и предполагают, что любая созданная новая технология немедленно используется, а Б. Годин, Г. Гальо, Д. Винк [6], П. Стоунман, Э. Бартолони, М. Бауссола [20] рассматривают модели R&D и модели внедрения новых технологий в предположении, что технология предоставляется независимо от ожидаемого экономического эффекта или результирующего пути распространения.

Данная работа является продолжением исследований, начатых в [22], [23], где рассматривается модель телекоммуникационного рынка с схемой ценообразования на услуги связи сетей 5G/6G и ценообразования на услуги мобильной связи с множественным доступом с использованием технологии 5G/6G.

В этой статье мы рассматриваем ценообразование на сетевые услуги в телекоммуникациях 5G/6G с использованием многопериодической модели распространения технологии, в соответствии с которой временной диапазон владения телекоммуникационной технологией определяется взаимодействием и характеристиками пользователей, телекоммуникационных компаний и временным профилем затрат на телекоммуникационные услуги новой технологии 5G/6G.

В этой статье строится и исследуется модель R&D, а также проводится численный анализ этой модели с учетом динамического ценообразования на услуги 5G/6G для случая олигополии на рынке телекоммуникаций. Также исследуется связь между расходами на R&D и распространением технологий 5G/6G. Мы рассматриваем технологический прогресс сетей 5G/6G, воплощенный в реализации сервисов сетей 5G/6G, которые востребованы пользователями и/или производителями устройств и оборудования. Существует группа пользователей, отличающиеся характеристики которых приводят к тому, что спрос на новые телекоммуникационные услуги определяется в зависимости от динамики цен и технологических характеристик сервисов сетей 5G/6G. Новые телекоммуникационные услуги предоставляются телекоммуникационными компаниями, и, учитывая затраты на внедрение новой технологии и технологические характеристики сервисов, взаимодействие спроса и предложения определяет временной профиль цен на новые сервисы, динамику прибыли компаний и общественного блага.

II. ИННОВАЦИИ, ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СЕТЕЙ 5G/6G

A. Построение модели R&D

В данной статье используется многопериодная модель диффузии новой технологии на рынке телекоммуникаций, которая будет включать в себя сервисы сетей 5G/6G, причем жизненный цикл технологии будет включать в себя не менее n ($t = 1, 2, \dots, n$) периодов. В модели предполагается, что

на рынке телекоммуникаций присутствует N_t ($N_1 < N_2, t = 1, 2, \dots, n$) пользователей сервисов 5G/6G на начало на начало каждого периода $t = 1, 2, \dots, n$.

Для определения числа пользователей сервисов 5G/6G будет использоваться решение уравнения Ферхюльста

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = sN \left(1 - \frac{N}{k} \right), \\ N_0 = N(0), \end{cases}$$

в виде

$$N_t = \frac{N_0 k e^{st}}{k - N_0 + N_0 e^{st}}, t = 1, 2, \dots, n,$$

где s, k, N_0 - положительные параметры.

Пусть функция $D_t(p_t)$ ($t = 1, 2, \dots, n$) - функция индивидуального спроса отдельного пользователя на сервисы сетей 5G/6G, где $p_t \geq 0$ ($t = 1, 2, \dots, n$) - цена на сервисы (например, ежемесячная плата за пользование сервисами 5G/6G в денежных единицах). Предполагается, что функция индивидуального спроса имеет вид:

$$D_t(p_t) = \alpha_t - \beta_t p_t, t = 1, 2, \dots, n,$$

где $\alpha_t > 0$ и $\beta_t > 0$ положительные параметры.

Совокупный рыночный спрос на сервисы сетей 5G/6G представляет собой сумму индивидуальных спросов отдельных пользователей

$$Q_t(p_t) = N_t D_t(p_t) = N_t (\alpha_t - \beta_t p_t) = A_t - B_t p_t,$$

$$A_t = N_t \alpha_t, B_t = N_t \beta_t,$$

а функция обратного совокупного спроса может быть представлена таким образом:

$$p_t(Q_t) = a_t - b_t Q_t,$$

$$a_t = A_t / B_t = \alpha_t / \beta_t > 0, b_t = 1 / B_t = (N_t \beta_t)^{-1} > 0.$$

Предполагается, что пользователи сервисов 5G/6G имеют информацию о цене p_t и о количестве компаний M_t поставщиков сервисов сетей 5G/6G на рынке телекоммуникаций в начале каждого из периодов $t = 1, 2, \dots, n$. Модель допускает возможность существования олигополии на рынке телекоммуникаций, когда небольшая группа крупных телекоммуникационных компаний (олигополистов) конкурирует между собой, выбирая объем предоставляемых сервисов 5G/6G пользователям.

Предполагается, что за периоды $t = 1, 2, \dots, n$ все присутствующие на рынке телекоммуникаций компании, имеют одинаковые предельные c_t и постоянные f_t издержки, связанные с оказанием сервисов 5G/6G пользователям, но расходы R_t на R&D осуществляет только часть компаний, которые являются технологическими лидерами на рынке телекоммуникаций.

Пусть объем продаж сервисов 5G/6G пользователям отдельной компанией в периоды t и $t+1$ для $t = 1, 2, \dots, n-1$ имеет вид:

$$q_t = \frac{Q_t}{M_t}, q_{t+1} = q_t + \frac{Q_{t+1} - Q_t}{M_{t+1}}, t > 1,$$

тогда прибыль компании-лидера $TP_{L,t+1}$ и компании-последователя $TP_{F,t+1}$ можно представить таким образом:

$$\begin{aligned} TP_{L,t+1} &= p_t q_t + p_{t+1} q_{t+1} - (c_t + c_{t+1}) q_t - \\ &\quad - c_{t+1} q_{t+1} - f_t - f_{t+1} - R_t, \quad t \geq 1, \\ TP_{F,t+1} &= p_{t+1} q_{t+1} - c_{t+1} q_{t+1} - f_{t+1}, \quad t \geq 1, \end{aligned}$$

где компании-последователи выходят на рынок в следующий момент и не имеют затрат R_t на R&D.

V. Равновесие на рынке телекоммуникаций

Согласно предположению Курно-Нэша, компания-лидер может рассматривать поведение компаний-конкурентов в части объема их продаж сервисов 5G/6G, максимизируя прибыль

$$\begin{cases} \frac{\partial TP_{L,t+1}}{\partial q_t} = p_t + q_t \frac{\partial p_t}{\partial q_t} + (p_{t+1} - c_{t+1}) \frac{\partial q_{t+1}}{\partial q_t} - (c_t + c_{t+1}) = 0, \\ \frac{\partial TP_{F,t+1}}{\partial q_{t+1}} = p_{t+1} - c_{t+1} = 0. \end{cases}$$

Равновесное решение (q_t^*, q_{t+1}^*) этой системы получается в виде:

$$\begin{aligned} q_t^* &= r_t^{-1} [(a_{t+1} - c_{t+1}) k_{t+1} - c_t], \\ q_{t+1}^* &= [b_{t+1} M_{t+1} r_t]^{-1} [(b_{t+1} k_{t+1}^2 M_{t+1} (k_{t+1}^2 - 1) - 2b_t M_t) c_{t+1} + \\ &\quad + (2b_t M_{t+1} - b_{t+1} k_{t+1}^2 M_{t+1}) a_{t+1}], \end{aligned}$$

где

$$k_t = 1 - M_t / M_{t+1}, \quad r_t = 2(b_t M_t - b_{t+1} k_{t+1}^2 M_{t+1}),$$

и равновесные цены (p_t^*, p_{t+1}^*) и равновесные объемы продаж (Q_t^*, Q_{t+1}^*) на рынке телекоммуникаций можно найти из соотношений:

$$\begin{aligned} p_t^* &= a_t - b_t M_t q_t^*, \quad p_{t+1}^* = a_{t+1} - b_{t+1} M_{t+1} q_{t+1}^*, \\ Q_t^*(p_t^*) &= N_t (\alpha_t - \beta_t p_t^*), \\ Q_{t+1}^*(p_{t+1}^*) &= N_{t+1} (\alpha_{t+1} - \beta_{t+1} p_{t+1}^*). \end{aligned}$$

Равновесная совокупная прибыль для каждой компании-лидера и компании-последователя имеют вид:

$$\begin{aligned} TP_{L,t+1}^* &= (p_t^* - c_t) q_t^* + (p_{t+1}^* - c_{t+1}) (q_{t+1}^* - q_t^*) - \\ &\quad - f_t - f_{t+1} - R_t, \\ TP_{F,t+1}^* &= (p_{t+1}^* - c_{t+1}) q_{t+1}^* - f_{t+1}, \end{aligned}$$

а равновесная совокупная отраслевая прибыль может быть получена в виде:

$$TP_{t,t+1}^* = M_t TP_{L,t+1}^* + (M_{t+1} - M_t) TP_{F,t+1}^*.$$

Равновесное общественное благо $(SS_{t,t+1}^*)$, которое является суммой равновесной совокупной отраслевой прибыли $(TP_{t,t+1}^*)$ и равновесного совокупного потребительского излишка $(CS_{t,t+1}^*)$, можно представить в виде:

$$\begin{aligned} CS_t^* &= 0.5[a_t - p_t^*] Q_t^*(p_t^*), \quad CS_{t+1}^* = 0.5[a_{t+1} - p_{t+1}^*] Q_{t+1}^*(p_{t+1}^*), \\ CS_{t,t+1}^* &= CS_t^* + CS_{t+1}^*, \quad SS_{t,t+1}^* = TP_{t,t+1}^* + CS_{t,t+1}^*. \end{aligned}$$

Условие равновесной устойчивости дает следующие неравенство:

$$\left| \frac{b_{t+1}}{b_t} \left(\frac{M_t}{M_{t+1}} - 1 \right) - 1 \right| < \sqrt{1 - 2 \frac{b_{t+1}}{b_t}}, \quad b_{t+1} < 0.5 b_t.$$

Для диффузионной траектории продаж сервисов 5G/6G в обоих периодах необходимо, чтобы выполнялось неравенство $Q_{t+1} > Q_t > 0$. Мы предполагаем, что эти условия сохраняются, и, таким образом, процесс диффузии новой технологии на рынке с течением времени действительно имеет место.

Таким образом, при идеальном предвидении компаний оптимальная диффузия новой технологии может быть достигнута только в том случае, если отрасль становится конкурентной.

Если поставщик-монополист или поставщик-олигополист могут осуществлять сегментированное ценообразование, назначая отдельную цену для каждого покупателя (необходимым условием для этого было бы полное отсутствие ценовых ожиданий на новые сервисы у потребителей, а не совершенное предвидение ими цены на эти сервисы), то результирующая диффузионная траектория рынка сервисов 5G/6G будет такая же, как и оптимальная траектория общественного блага $SS_{t,t+1}^*$. Однако в этих условиях поставщик-монополист будет присваивать себе весь излишек потребителя $CS_{t,t+1}^*$ в качестве прибыли, в то время как при совершенном предвидении ценовой динамики на рынке потребителями и при наличии большого числа компаний-поставщиков сервисов 5G/6G, несмотря на то, что диффузионная траектория развития новой технологии будет являться оптимальной, поставщики сервисов будут иметь нулевой излишек производителя, а потребители сервисов получают излишек в полном объеме.

Таким образом, несмотря на то, что одина и та же траектория динамики рынка может быть результатом различных типов предвидений потребителями новых сервисов 5G/6G и цен на них, но динамика распределения излишков потребителей и производителей будет различной. Необходимо отметить, что потребителей и производителей, т.е. общественное благо в целом, являются серьезным мотивом для развития новых технологий 5G/6G компаниями, и поэтому можно ожидать, что такое развитие новых технологий 5G/6G будет чувствительным как к ожиданиям потребителей инноваций, которые принесет новая технология 5G/6G, так и к набору сервисов, которые будут поставляться компаниями потребителям.

III. Численный анализ распространения новой технологии для сетей 5G/6G

Для численного моделирования с целью проведения анализа распространения новой технологии на рынке телекоммуникаций предполагается рассмотреть 4-периодную модель, причем количество телекоммуникационных компаний в начальный момент $t = 1$ может быть равно двум $M_1 = 2$ в случае дуополии или более двух $M_1 > 2$ в случае олигополии, но при этом будем считать, что $M_{t+1} > M_t$ в моменты $t > 1$, где

параметр $k = 1 - M_1 / M_2$ может изменяться в пределах $k \in (0,1)$, если $M_t \rightarrow \infty$ ($t = 2,3,4$).

Параметры модели, которые использовались для численного анализа, представлены в Таб. 1, где размерность параметров следующая: α_t - параметр, задающий количество условных единиц сервисов сетей 5G/6G, которые пользователь потребляет в период t (Units of Services, UoS); β_t - параметр, задающий количество условных единиц сервисов сетей 5G/6G, которые пользователь потребляет в период t , отнесенной к количеству условных денежных единиц (Units of Services per Monetary Units, UoSpmU); N_t - число потенциальных абонентов на рынке телекоммуникаций, которые готовы пользоваться сервисами сетей 5G/6G в период t (Numbers of potential users, NoPU), где выбраны положительные параметры модели $s = 1,8$, $k = 50$, $N_0 = 1$; c_t - предельные издержки компании по предоставлению сервисов сетей 5G/6G в период t (Marginal Costs in Monetary Units, MCMU); f_t - фиксированные издержки компании по предоставлению сервисов сетей 5G/6G в период t (Fixed Costs in Monetary Units, FCMU); R_t - издержки компании на проведение R&D в период t (R&D Costs in Monetary Units, RDCMU).

Таблица 1.

Параметры модели для численного анализа

Параметры	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$
α_t , UoS	7,2	28,9	43,2	51,3
β_t , UoSpmU	0,01	0,04	0,17	0,67
N_t , million NoPU	5,50	21,38	40,94	48,24
c_t , MCMU	0,007	0,005	0,002	0,001
f_t , million FCMU	0,6	0,4	0,2	0,1
R_t , million RDCMU	12,3	0	0	0

На Рис. 1 показана оптимальная динамика продаж $q_t^*(k)$ сервисов 5G/6G отдельно взятой компанией.

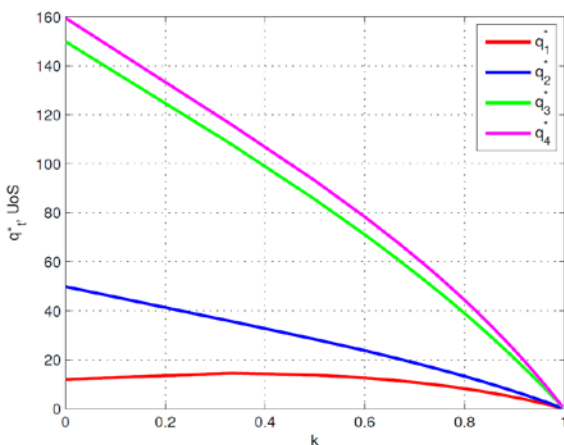


Рис. 1. Оптимальная динамика продаж $q_t^*(k)$ сервисов 5G/6G компанией в периоды $t = 1, 2, 3, 4$.

Как видно на Рис. 1 у компании-лидера оптимальный объем продаж $q_t^*(k)$ сервисов 5G/6G растет в течение первого периода $t = 1$ до некоторой величины, если на рынке сервисов 5G/6G ожидается ограниченное количество компаний в начале следующих периодов $t = 2, 3, 4$ и $q_t^*(k)$ снижаются в течение первого периода $t = 1$, если большое количество компаний планируют выйти на этот рынок в начале следующих периодов $t = 2, 3, 4$. Также видно, что оптимальные продажи $q_t^*(k)$ сервисов 5G/6G будут постоянно снижаться из-за растущей конкуренции, если в начале следующих периодов $t = 2, 3, 4$ на рынок услуг 5G/6G выходит все большее количество компаний.

На Рис. 2 показана оптимальная отраслевая динамика общего рыночного спроса $Q_t^*(k)$ на сервисы 5G/6G за периоды $t = 1, 2, 3, 4$. Мы можем наблюдать рост $Q_t^*(k)$, если ограниченное количество компаний-последователей планирует войти на рынок сервисов 5G/6G в начале периодов $t = 2, 3, 4$, и снижение $Q_t^*(k)$, если большое количество компаний-последователей планирует выйти на этот рынок в начале периодов $t = 2, 3, 4$.

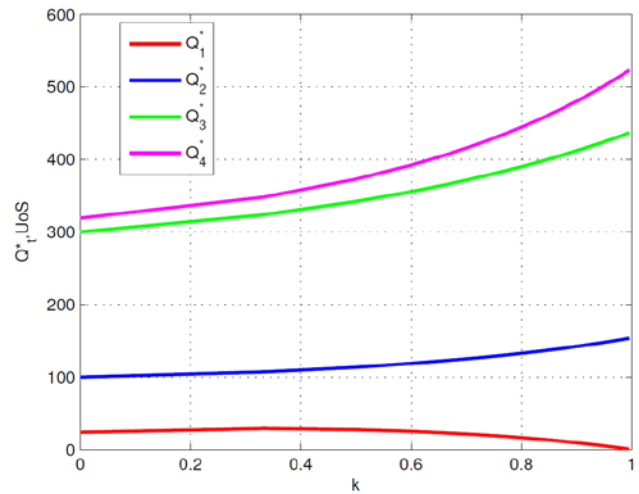


Рис. 2. Общий рыночный спрос $Q_t^*(k)$.

Объяснение этой динамики общего рыночного спроса $Q_t^*(k)$ можно найти, если посмотрим на Рис. 3.

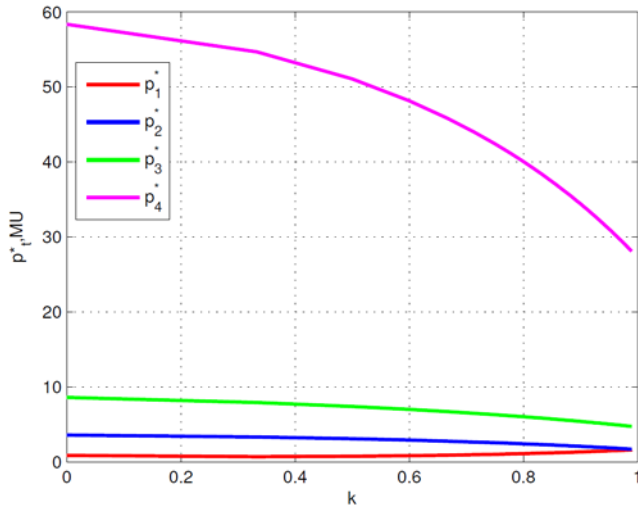


Рис. 3. Динамика оптимальных цен $p_i^*(k)$ в периоды $t = 1, 2, 3, 4$.

Оптимальная динамика цен $p_i^*(k)$ на сервисы 5G/6G демонстрирует тенденцию к снижению, если в начале периодов $t = 2, 3, 4$ на рынке сервисов 5G/6G ожидается ограниченное количество компаний-последователей, но в остальном $p_i^*(k)$ демонстрируют тенденцию к росту. Таким образом, мы видим, что цены на сервисы 5G/6G растут, если общие фиксированные затраты компаний в отрасли увеличиваются, когда большое количество компаний-последователей планируют выйти на рынок в начале периодов $t = 2, 3, 4$.

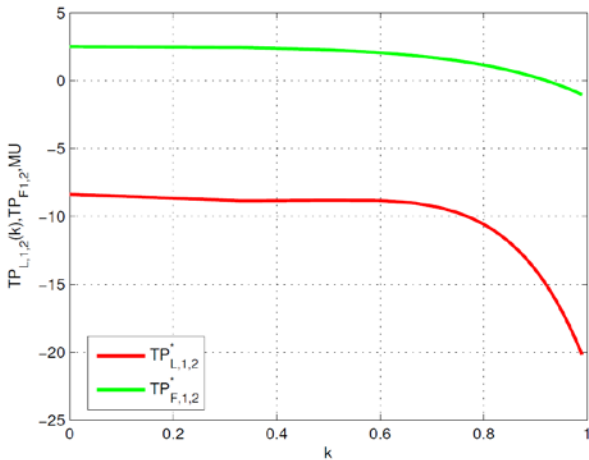


Рис.4. Оптимальная динамика совокупной прибыли компаний $TP_{L,1,2}^*(k), TP_{F,1,2}^*(k)$ в периоды $t = 1, 2$.

На Рис. 4-6 показана оптимальная динамика совокупной прибыли компании $(TP_{L,t,t+1}^*(k), TP_{F,t,t+1}^*(k))$ при $t = 1, 2, 3, 4$, которая неуклонно снижается при условии, что количество компаний-последователей, которые планируют выйти на рынок в начале периодов $t = 2, 3, 4$, растет.

Оптимальная совокупная прибыль компаний-лидеров $TP_{L,1,2}^*(k)$ меньше оптимальной совокупной прибыли компаний-последователей $TP_{F,1,2}^*(k)$, что обусловлено дополнительными затратами на R&D компаний-лидеров в течение периода $t = 1$, но в остальные периоды ситуация меняется на

противоположную, так как компании-лидеры могут использовать элементы рыночной власти по отношению к пользователям сервисов 5G/6G.

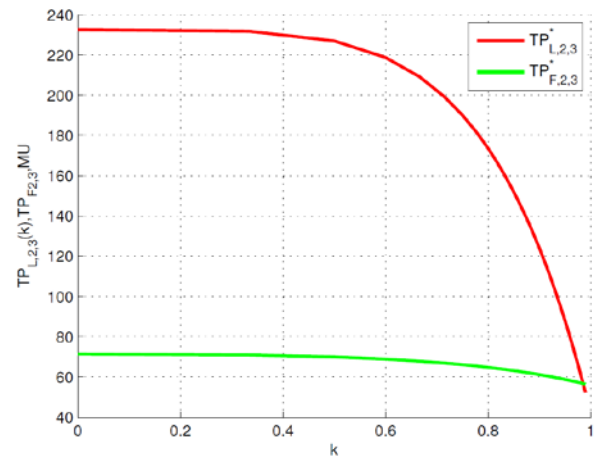


Рис.5. Оптимальная динамика совокупной прибыли компаний $TP_{L,2,3}^*(k), TP_{F,2,3}^*(k)$ в периоды $t = 2, 3$.

Все эти факторы влияют на рынок таким образом, что оптимальная совокупная прибыль отрасли $TP_{t,t+1}^*(k)$ и оптимальное общественное благо $SS_{t,t+1}^*(k)$ снижаются в периоды $t = 1, 2, 3, 4$, если большое количество компаний-последователей планируют выйти на рынок в начале периодов $t = 2, 3, 4$ (см. Рис. 7-8).

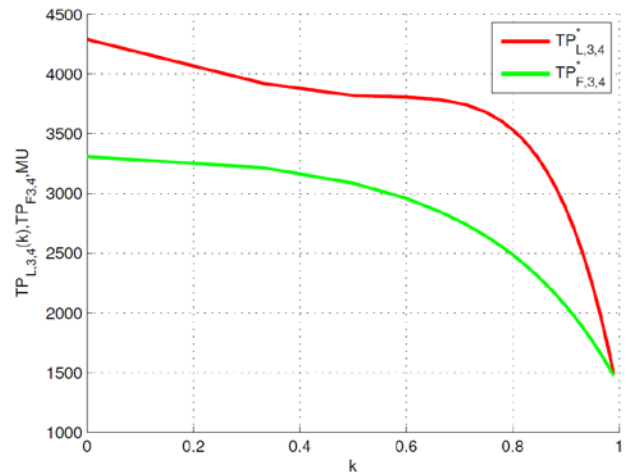


Рис.6. Оптимальная динамика совокупной прибыли компаний $TP_{L,3,4}^*(k), TP_{F,3,4}^*(k)$ в периоды $t = 3, 4$.

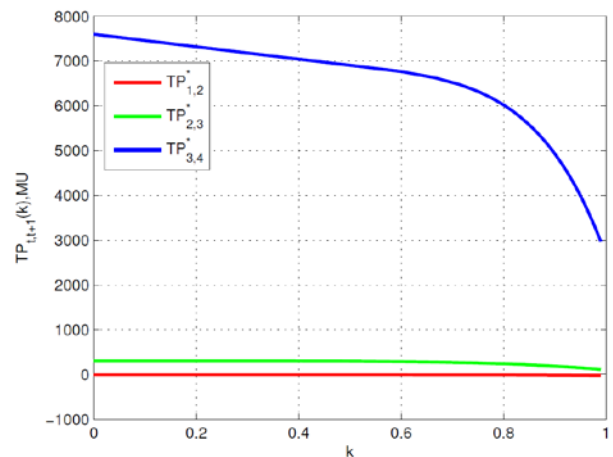
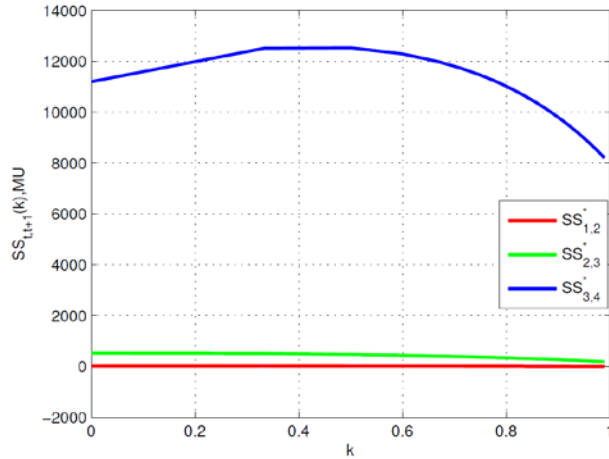


Рис.7. Оптимальная динамика совокупной отраслевой прибыли $TP_{t,t+1}^*(k)$ в периоды $t = 1, 2, 3, 4$.Рис.8. Оптимальная динамика общественного блага $SS_{t,t+1}^*(k)$ в периоды $t = 1, 2, 3, 4$.

Необходимо отметить, что оптимальное общественное благо $SS_{3,4}^*(k)$ увеличивается в интервале $k \in [0, 0.4]$ и уменьшается в интервале $k \in [0.4, 1]$ при увеличении параметра $k \rightarrow 1$, что дает возможность регулятору рынка выбрать такое число компаний на рынке, которое обеспечит наибольшее общественное благо в этом периоде.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена многопериодная модель диффузии новой технологии, в которой эволюционная динамика внедрения сервисов сетей 5G/6G определяется взаимодействием пользователей и компаний телекоммуникационной отрасли, а также временным профилем затрат на R&D компаниями-лидерами. Характер динамики прибыли компаний-лидеров обеспечивает интерес этих компаний к R&D в области технологий сетей 5G/6G. Отраслевая конкурентная борьба с использованием R&D разработок позволяет рассматривать ее в качестве эндогенно обусловленного фактора рынка, где R&D, а также темп технологического прогресса в области связи, снижение себестоимости производства нового оборудования для сетей 5G/6G, формирование новых рыночных структур в телекоммуникационной отрасли, формирование временного профиля цен на новые услуги, позволяют эффективно управлять отраслью регуляторами рынка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Публикация выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН (получатель С.А.Васильев, разработка математической модели, реализация численной схемы, проведение численного анализа).

БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Y. Adou, E.Markova, Y.Gaidamaka, "Modeling and Analyzing Preemption-Based Service Prioritization in 5G Networks Slicing Framework," *Future Internet*, vol. 14, no. 10, p. 299, 2022.

[2] B.Attanasio, A.La Corte, M.Scata, "Evolutionary dynamics of MEC-s organization in a 6G scenario through EGT and temporal multiplex social network," *ICT Express*, vol. 7, No 2, pp. 138-142, 2021.

[3] C.Bouras, S.Kokkalis, A.Kollia, "Techno-economic comparison of MIMO and DAS cost models in 5G networks," *Wireless Networks*, vol. 26, pp. 1-15, 2020.

[4] S.Cuomo, V. D.Somma, F. Piccialli, "Pricing estimation of a barrier option in an IoT scenario," *Future Generation Computer Systems*, vol. 110, pp. 407-412, 2020.

[5] P.Dasgupta, J.Stiglitz, "Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity," *Economic Journal*, vol. 90, pp. 266-293, 1980.

[6] B.Godin, G.Gaglio, D.Vinck, *Handbook on Alternative Theories of Innovation*, Edward Elgar Publishing, 2021.

[7] H.Hui, Y.Ding, Q.Shi, F. Li, Y.Song, J.Yan, "5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential," *Applied Energy*, vol. 257, p. 113972, 2020.

[8] G.Knieps, J. M.Bauer, "Internet of things and the economics of 5G-based local industrial networks," *Telecommunications Policy*, vol. 46, No 4, p. 102261, 2022.

[9] A.Kondratyeva, D. Ivanova, V. Begishev, E.Markova, E. Mokrov, Y.Gaidamak, K. Samouylov, "Characterization of Dynamic Blockage Probability in Industrial Millimeter Wave 5G Deployments," *Future Internet*, vol. 14, No. 7, p. 193, 2022.

[10] X. Li, S. Nosheen, N. U. Haq, X.Gao, "Value creation during fourth industrial revolution: Use of intellectual capital by most innovative companies of the world," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 163, p. 120479, 2021.

[11] K. Maeng, J. Kim, J.Shin, "Demand forecasting for the 5G service market considering consumer preference and purchase delay behavior," *Telematics and Informatics*, vol. 47, p. 101327, 2020.

[12] M. Moussaoui, E. Bertin, N.Crespi, "Telecom Business Models for Beyond 5G and 6G networks: Towards Disaggregation?," *1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*, Paris, France, 2022, pp. 1-8, 2022.

[13] E. J. Oughton, W. Lehr, "Surveying 5G Techno-Economic Research to Inform the Evaluation of 6G Wireless Technologies," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25237-25257, 2022.

[14] E. J. Oughton, A. Jha, "Supportive 5G Infrastructure Policies are Essential for Universal 6G: Assessment Using an Open-Source Techno-Economic Simulation Model Utilizing Remote Sensing," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 101924-101945, 2021.

[15] A .Palm, "Innovation systems for technology diffusion: An analytical framework and two case studies," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 182, p. 121821, 2022.

[16] P.L.Parcu, N. Innocenti, C. Carrozza, "Ubiquitous technologies and 5G development. Who is leading the race?," *Telecommunications Policy*, vol. 46, No 4, p. 102277, 2022.

[17] Y.Peng, J. Li, H.Hai, X.-Q. Jiang, F. Al-Hazemi, S. Park, "Cost optimization of distributed data centers via computing workload distribution for next generation network systems," *Physical Communication*, vol. 46, p. 101340, 2021.

[18] J. Rendon Schneir, K. Konstantinou, J. Bradford, G. Zimmermann, H. Droste, R. Canto Palancar, A. Ajibulu, "Cost assessment of multi-tenancy for a 5G broadband network in a dense urban area," *Digital Policy, Regulation and Governance*, vol. 22, No. 2, pp. 53-70, 2020.

[19] S. Sidorov, A. Faizliev, V. Balash, O. Balash, M. Krylova, A. Fomenko, "Extended innovation diffusion models and their empirical performance on real propagation data," *Journal of Marketing Analytics*, vol. 9, pp. 99-110, 2021.

[20] P. Stoneman, E. Bartoloni, M. Baussola, "The Microeconomics of Product Innovation," *Published to Oxford Scholarship*, 2018.

[21] E.C. Strinati, S. Barbarossa, "6G networks: Beyond Shannon towards semantic and goal-oriented communications," *Computer Networks*, vol. 190, p. 107930, 2021.

[22] S. Vasilyev, I. Levichev, D. P. Acosta, "Network asymmetries and pricing in 5G telecommunications," In: *12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Brno, Czech Republic, 2020, pp. 173-178, 2020.

[23] S. Vasilyev, I. Levichev, D. P. Acosta, "Dynamic pricing model for 5G/6G telecommunications," In: *13th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Brno, Czech Republic, 2021, pp. 85-90, 2021.

[24] N. Yarkina, L.M. Correia, D. Moltchanov, Y. Gaidamaka, K. Samouylov, "Multi-tenant resource sharing with equitable-priority-

based performance isolation of slices for 5G cellular systems.” *Computer Communications*, vol. 188, pp. 39-51, 2022.

- [25] N. Ye, J. Yu, A. Wang, R. Zhang, “Help from space: grant-free massive access for satellite-based IoT in the 6G era,” *Digital Communications and Networks*, vol. 8, no. 2, pp. 215-224, 2022.
- [26] Z. Zheng, L. Wang, F. Zhu, L. Liu, “Potential technologies and applications based on deep learning in the 6G networks,” *Computers & Electrical Engineering*, vol. 95, p. 107373, 2021.

Левичев Игорь Владимирович, аспирант кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования " Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-8566-9461>, levicev-iv.rudn@mail.ru

Васильев Сергей Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Федеральное государственное

автономное образовательное учреждение высшего образования " Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1562-0256>, vasilyev-sa@rudn.ru

Канзитдинов Шахмурад Канзитдинович, аспирант кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования " Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3972-7739>, shahkanzitdinov@mail.ru

Перес Акоста Даниэль, аспирант кафедры математического моделирования и искусственного интеллекта, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования " Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы", 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4937-1796>, peresacostadaniel@mail.ru

Numerical analysis of the dynamic pricing model for 5G/6G services for oligopoly telecommunications markets

I.V. Levichev, S.A. Vasilyev, S.K.Kanzitdinov, D. Peres Acosta

Abstract— In this paper, we consider a model of dynamic pricing in the 5G/6G telecommunications market with incomplete competition and use the simulation analysis of dynamic pricing for 5G/6G services in case when there is the oligopoly game in telecommunications industry. We consider network services pricing in 5G/6G telecommunications with multi-period technology diffusion model. The time path of 5G/6G telecommunication market demand, the price dynamics, the social surplus and the company profits, when the telecommunication companies implement new technologies, are studied. The the relationship between users, the telecommunication companies and the telecommunication services costs for new 5G/6G technologies are investigated. The telecommunication industry equilibrium is considered with free telecommunication market entry and exit. We study the optimal multi-period dynamics of the telecommunication companies' profits for the case when the companies implements 5G/6G innovations using research and development (R&D). We analyze R&D expenditure on the services and the innovation process of 5G/6G technology, assuming a different number of the telecommunication companies undertaking R&D. We study the multi-period diffusion model of 5G/6G technology in the telecommunications market and also investigate the stability of this process depending on the number of companies that are present on the market.

Keywords — access dynamic pricing, oligopoly game in telecommunications industry, 5G/6G telecommunications, research and development (R&D), multi-period diffusion model

ACKNOWLEDGMENT

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program (recipient S.A. Vasilyev, mathematical model development, simulation model development, numerical analysis).

REFERENCES

- [1] Y. Adou, E.Markova, Y.Gaidamaka, "Modeling and Analyzing Preemption-Based Service Prioritization in 5G Networks Slicing Framework," *Future Internet*, vol. 14, no. 10, p. 299, 2022.
- [2] B.Attanasio, A.La Corte, M.Scata, "Evolutionary dynamics of MEC-s organization in a 6G scenario through EGT and temporal multiplex social network," *ICT Express*, vol. 7, No 2, pp. 138-142, 2021.
- [3] C.Bouras, S.Kokkalis, A.Kollia, "Techno-economic comparison of MIMO and DAS cost models in 5G networks," *Wireless Networks*, vol. 26, pp. 1-15, 2020.
- [4] S.Cuomo, V. D.Somma, F. Piccialli, "Pricing estimation of a barrier option in an IoT scenario," *Future Generation Computer Systems*, vol. 110, pp. 407-412, 2020.
- [5] P.Dasgupta, J.Stiglitz, "Industrial Structure and the Nature of Innovative Activity," *Economic Journal*, vol. 90, pp. 266-293, 1980.
- [6] B.Godin, G.Gaglio, D.Vinck, Handbook on Alternative Theories of Innovation, Edward Elgar Publishing, 2021.
- [7] H.Hui, Y.Ding, Q.Shi, , F. Li, Y.Song, J.Yan, "5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential," *Applied Energy*, vol. 257, p. 113972, 2020.
- [8] G.Knieps, J. M.Bauer, "Internet of things and the economics of 5G-based local industrial networks," *Telecommunications Policy*, vol. 46, No 4, p. 102261, 2022.
- [9] A.Kondratyeva, D. Ivanova, V. Begishev, E.Markova, E. Mokrov, Y.Gaidamak , K. Samouylov, "Characterization of Dynamic Blockage Probability in Industrial Millimeter Wave 5G Deployments," *Future Internet*, vol. 14, No. 7, p. 193, 2022.
- [10] X. Li, S. Nosheen, N. U. Haq, X.Gao, "Value creation during fourth industrial revolution: Use of intellectual capital by most innovative companies of the world," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 163, p. 120479, 2021.
- [11] K. Maeng, J. Kim, J.Shin, "Demand forecasting for the 5G service market considering consumer preference and purchase delay behavior," *Telematics and Informatics*, vol. 47, p. 101327, 2020.
- [12] M. Moussaoui, E. Bertin, N.Crespi, "Telecom Business Models for Beyond 5G and 6G networks: Towards Disaggregation?," *1st International Conference on 6G Networking (6GNet)*, Paris, France, 2022, pp. 1-8, 2022.
- [13] E. J. Oughton, W. Lehr, "Surveying 5G Techno-Economic Research to Inform the Evaluation of 6G Wireless Technologies," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 25237-25257, 2022.
- [14] E. J. Oughton, A. Jha, "Supportive 5G Infrastructure Policies are Essential for Universal 6G: Assessment Using an Open-Source Techno-Economic Simulation Model Utilizing Remote Sensing," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 101924-101945, 2021.
- [15] A .Palm, "Innovation systems for technology diffusion: An analytical framework and two case studies," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 182, p. 121821, 2022.
- [16] P.L.Parcu, N. Innocenti, C. Carrozza, "Ubiquitous technologies and 5G development. Who is leading the race?," *Telecommunications Policy*, vol. 46, No 4, p. 102277, 2022.
- [17] Y.Peng, J. Li, H.Hai, X.-Q. Jiang, F. Al-Hazemi, S. Park, "Cost optimization of distributed data centers via computing workload distribution for next generation network systems," *Physical Communication*, vol. 46, p. 101340, 2021.
- [18] J. Rendon Schneir, K. Konstantinou, J. Bradford, G. Zimmermann, H. Droste, R. Canto Palancar, A. Ajibulu, "Cost assessment of multi-tenancy for a 5G broadband network in a dense urban area," *Digital Policy, Regulation and Governance*, vol. 22, No. 2, pp. 53-70, 2020.
- [19] S. Sidorov, A. Faizliev, V. Balash, O. Balash, M. Krylova, A. Fomenko, "Extended innovation diffusion models and their empirical performance on real propagation data," *Journal of Marketing Analytics*, vol. 9, pp. 99-110, 2021.
- [20] P. Stoneman, E. Bartoloni, M. Baussola, "The Microeconomics of Product Innovation," *Published to Oxford Scholarship*, 2018.
- [21] E.C. Strinati, S. Barbarossa, "6G networks: Beyond Shannon towards semantic and goal-oriented communications," *Computer Networks*, vol. 190, p. 107930, 2021.
- [22] S. Vasilyev, I. Levichev, D. P. Acosta, "Network asymmetries and pricing in 5G telecommunications," *In: 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, Brno, Czech Republic, 2020, pp. 173-178, 2020.
- [23] S. Vasilyev, I. Levichev, D. P. Acosta, "Dynamic pricing model for 5G/6G telecommunications," *In: 13th International Congress on*

Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Brno, Czech Republic, 2021, pp. 85-90, 2021.

- [24] N. Yarkina, L.M. Correia, D. Moltchanov, Y. Gaidamaka, K. Samouylov, "Multi-tenant resource sharing with equitable-priority-based performance isolation of slices for 5G cellular systems," *Computer Communications*, vol. 188, pp. 39-51, 2022.
- [25] N. Ye, J. Yu, A. Wang, R. Zhang, "Help from space: grant-free massive access for satellite-based IoT in the 6G era," *Digital Communications and Networks*, vol. 8, no. 2, pp. 215-224, 2022.
- [26] Z. Zheng, L. Wang, F. Zhu, L. Liu, "Potential technologies and applications based on deep learning in the 6G networks," *Computers & Electrical Engineering*, vol. 95, p. 107373, 2021.

Levichev Igor Vladimirovich, Postgraduate Student, Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str.6, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8566-9461>**, levichev-iv.rudn@mail.ru

Vasilyev Sergey, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str.6, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1562-0256>**, vasilyev-sa@rudn.ru

Kanzitdinov Shakhmurad Kanzitdinovich, Postgraduate Student, Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str.6, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3972-7739>**, shahkazitdinov@mail.ru

Peres Acosta Daniel, Postgraduate Student, Department of Mathematical Modeling and Artificial Intelligence, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, 117198, Moscow, Miklukho-Maklaya str.6, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4937-1796>**, peresacostadaniel@mail.ru