

Математические модели социально-экономических процессов

Моделирование оценки системной эффективности развития сетевой транспортной инфраструктуры

Н.И. Белоусова¹, С.П. Бушанский^{II}, Е.М. Васильева¹, В.Н. Лившиц¹, И.А. Миронова¹

¹ Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия

^{II} Федеральное государственное бюджетное учреждение «Центральный экономико-математический институт Российской академии наук», г. Москва, Россия

Аннотация. Исследован спектр моделей выявления естественно-монопольных свойств сетевой транспортной инфраструктуры, отвечающий изменениям параметров функций совокупных издержек. Применительно к моделированию развития фрагментов региональной транспортной сети разработаны расчетные конструкции оценки системной эффективности, позволяющие уточнить влияние на нее эффекта естественно-монопольной синергии, соответствующего области положительных значений технологического детерминанта экономии от структуры и приближенно измеряющего величину запаса субаддитивности издержек. Представлены результаты расчетов, связанных как с уточнениями методического характера в постановках и методах решения задач диагностики естественно-монопольных свойств (прежде всего, с использованием специальных расширений алгоритмов поиска оптимальной технологии перевозок), так и с модификациями вычислительных экспериментов в части анализа количественных оценок при вариации учитываемых факторов.

Ключевые слова: сетевая транспортная инфраструктура, системная эффективность, естественно-монопольные индикаторы, постановки задач диагностики, тестирование субаддитивности функции издержек, технологические детерминанты, внегородская сеть дорог, системное и пользовательское равновесие, варьирование нормы дисконта, затратная эластичность.

DOI: 10.14357/20790279230308

Введение

Данная статья является продолжением обсуждения вопросов, связанных с переходом от теоретических моделей диагностики естественно-монопольных свойств сетевой транспортной

инфраструктуры к их прикладным аналогам, предназначенным для получения соответствующих количественных оценок [1,2].

В качестве ключевой проблемы моделирования оценки системной эффективности развития

сетевых инфраструктурных подсистем рассматривается проблема выявления их естественно-монопольных свойств. Такой подход актуален с точки зрения эффективного государственного управления функционированием и развитием естественных монополий. Основное внимание уделяется формируемым моделям диагностики естественно-монопольных свойств сетевых инфраструктурных технологий, включая развитие подходов к системной (нормативной и поведенческой) идентификации естественных монополий.

Предлагаемая методология опирается на рациональное сочетание модельных конструкций, принятых в современной теории естественной монополии, методов оптимизации/субоптимизации развития нелинейных пространственных сетей, допускающих гибкое представление инфраструктурных технологий, с методами инвестиционного проектирования, предусматривающими учет взаимосвязей параметров технологий в сфере естественных монополий и оценок эффективности при выборе и обосновании сетевых транспортных проектов.

Работоспособность предлагаемых подходов обоснована теоретически и подтверждена эмпирической проверкой конструируемых прикладных моделей оценки инвестиций в инфраструктурные объекты при различных постановках задач нормативной идентификации транспортной сети как естественной монополии, допускающей генерацию недостающих исходных данных за счет освоенных в ЦЭМИ РАН и ФИЦ ИУ РАН специальных приемов моделирования нелинейных затратных характеристик [3,4].

1. Элементы теории для решения задачи нормативной идентификации естественной монополии

Исходя из современной теории естественной монополии (прежде всего, см. [5-9]), возможно проведение ее системной идентификации, которая включает технологический аспект (нормативную идентификацию) и поведенческий (поведенческую идентификацию). В обоих случаях используются модели функции издержек, что предполагает наличие данных об оптимальных технологиях выпуска продукции при удовлетворении спроса на услуги транспортной сети. При этом предусматривается учет условий субоптимизации распределения по сети моделируемых корреспонденций и развития звеньев сети. В настоящей статье преимущественно рассматриваются возможности нормативной иден-

тификации для целей диагностики естественно-монопольных свойств транспортных сетей.

Перевод содержательного определения естественной монополии (когда одной фирмой дешевле производить те же объемы выпусков, чем несколькими) в формальное может приводить к математическому выражению субаддитивности многопродуктовой функции издержек. Для общего случая анализа деятельности многопродуктовых объектов инфраструктуры в теории доступно не строгое аналитическое доказательство свойства субаддитивности функции совокупных издержек производства, а лишь доказательство на основе совокупности необходимых и достаточных условий, в том числе, с использованием системы специальных тестов.

Для выявления свойств субаддитивности функции совокупных издержек производства предлагаются следующие виды тестов:

- прямой на подтверждение естественной монополии – непосредственная количественная оценка соотношений субаддитивности издержек на специально конструируемой вычислительной сетке в ходе экспериментальных проверок этого свойства (без привлечения оценок по моделям технологических детерминант);
- прямой на отрицание естественной монополии – с оценкой одного технологического детерминанта – экономии от структуры (SC);
- косвенный на подтверждение естественной монополии – с оценками системы технологических детерминант (включая экономию от структуры – SC , средние приростные издержки – AIC , экономию от масштаба – S), рассчитываемыми по функции издержек [5,6]¹.

Для учета сетевых, прежде всего, топологических особенностей транспортных сетей мезоуровня вводится сетевая концепция субаддитивности издержек [2,6]. В соответствии с этой концепцией нарушение свойств естественной монополии для сети интерпретируется, прежде всего, как следствие ее перегруженности. Это определяет целесо-

¹ Индикатор экономии от структуры (SC) обеспечивает сравнение по издержкам гипотетических вариантов форм организации производства через ортогональные расщепления; включаются в рассмотрение варианты совместного производства всех видов продукции и варианты организации производств, которые полностью специализированы по одному или нескольким видам деятельности, суммарно обеспечивающих одинаковый объем спроса.

Оценка индикатора средних приростных издержек (AIC) связана с началом/прекращением выпуска какого-то одного продукта; в расчет эффективности включается прирост издержек/их экономия на единицу объема выпуска этого продукта.

Индикатор экономии от масштаба (S) – обратная величина к затратной эластичности, результат оценки сравнительной динамики: темпов прироста совокупных издержек и объемов выпуска продукции/услуг.

образность формирования управленческих решений о проведении соответствующих структурных и организационных преобразований, например, речь может идти о снижении нагрузки посредством передачи части ее на конкурирующие сети или о корректировке сложившейся структуры территориального развития.

При решении задачи автономной нормативной идентификации, т.е. без анализа взаимосвязей с характеристиками сетевого проекта, оцениваются значения естественно-монопольных индикаторов деятельности/технологических детерминант для различных уровней выпуска/спроса и проверяются необходимые и достаточные условия существования естественной монополии, разработанные в [5]. Необходимым условием субаддитивности является наличие экономии от структуры ($SC > 0$). Достаточные условия субаддитивности определяются соблюдением совокупности двух следующих требований: а) снижение во всей допустимой области выпуска средних приростных издержек (AIC) по всем наборам продуктов/услуг; б) наличие экономии от структуры.

В [5] также доказано, что условие $SC > 0$ является и необходимым, и достаточным только при моделировании отраслевой технологии как однопродуктовой. Но при однопродуктовом представлении отрасли имеет место излишняя агрегация, которая может приводить к неверным выводам относительно эффективности деятельности и не позволяет давать оценки по структурным преобразованиям в сферах естественных монополий [3,5].

Кроме того, корректная идентификация естественной монополии не предполагает использование индикатора экономии от масштаба (S), но этот индикатор, как обратная величина к показателю затратной эластичности по выпуску, может оказаться полезным при анализе эффективности/неэффективности деятельности в рамках той или иной организационной структуры.

2. Построение компьютерных экспериментов тестирования естественно-монопольных свойств сетевых инфраструктурных технологий

Применительно к фрагменту сети внегородских дорог строится многопродуктовая функция издержек, на ее основе рассчитываются технологические детерминанты - ключевые индикаторы (SC , AIC , S). По ним проводится тестирование функции издержек на субаддитивность и выявляется наличие (или отсутствие) свойств естественной монополии при производстве двух ви-

дов продукции (услуг): выполнении грузовых и пассажирских перевозок.

Эконометрическим способом с использованием пакета EViews (версия 11.0) по 625 точкам для объемов спроса на грузовые перевозки (в пределах от 0 до 30,5 млрд поездок в год) и на пассажирские перевозки (от 0 до 79,9 млрд поездок в год) моделируется общесетевая функция совокупных издержек для двухпродуктового случая.

В качестве исходных при построении процедур диагностики и анализе результатов расчетов, представляемых далее в Разделе 3 настоящей статьи, принимаются следующие положения. Задаются объемы нагрузки на сеть с разделением спроса на грузовые и пассажирские перевозки. Структура объемов корреспонденций задана и постоянна. Соответственно, «шахматка» корреспонденций не зависит от затрат на поездки, что отвечает предположению об экзогенном спросе. Учитываются соответствующие параметры фиксированной топологии сети или переменной, когда допускаются изменения технических состояний звеньев, причем как существующих, так и потенциальных, т.е. в алгоритмах оптимизации предусматриваются возможности изменений в структуре и конфигурации (начертании) сети. Моделирование функций издержек проводится в предположении, что цены на используемые ресурсы фиксированы (как, например, норма дисконта, назначаемая по вариантам) и/или постоянны. При эконометрическом моделировании квази-функции издержек для оценки субаддитивности, чтобы избежать априорной предсказуемости значений параметров, применяется квадратичная форма [5,7,8].

Посредством серий экспериментальных расчетов анализируется влияние способа выбора маршрутов (в соответствии с условиями пользовательского или системного равновесия) на естественно-монопольные свойства автодорожной сети. При этом имеют место различия, связанные с использованием для поиска оптимальных (или приближенных к ним) технологий двух следующих разных типов процедур субоптимизации при выборе кратчайших маршрутов следования корреспонденций: по средним издержкам пользователей или по предельным системным издержкам с учетом внетранспортных экстерналий.

Системное равновесие достигается, когда любое изменение выбора маршрутов не может улучшить системный критерий. При пользовательском равновесии ни один пользователь не может снизить свои издержки, изменив свой выбор, если другие своего выбора не меняют.

В большинстве случаев в теории оптимизации распределения потоков на транспортных сетях принято в зависимости от выбираемого критерия маршрутизации называть модели и методы, используемые при распределении потоков по критерию пользовательского равновесия, процедурами «по средним издержкам» и, напротив, модели и методы, используемые при распределении потоков по критерию системного равновесия – процедурами «по предельным издержкам». Как доказано в теории (см., например, [10-13]), причем не только при моделировании для случая линейных, но и нелинейных издержек сетевых транспортных технологий [13-16], системное равновесие обеспечивается, когда все требуемые перевозки направляются по кратчайшим, в смысле дифференциальных (предельных) затрат, маршрутам от пункта отправления к пункту прибытия.

При моделировании должны быть учтены разные типы основных внетранспортных экстерналий: как негативные (ущерб от ДТП и экологический ущерб), так и позитивные (внетранспортный эффект от снижения затрат пользователей). С позиции базовых положений теории естественной монополии, проверка свойств субаддитивности должна выполняться для оптимальных технологий: это требование строго соответствует выбору маршрутов по предельным системным издержкам. Но маршруты выбирают пользователи; их выбор, в первом приближении, моделируется условиями равновесия Нэша. Вместе с тем, практически трудно осуществить эффективное управление поведением пользователей так, чтобы эффективно сблизить расхождение общественного и пользовательского равновесий [17]. Тем не менее, принимаем допущение, что такая успешная система мер (возможно, на основе стимулирования более выгодного, для сети в целом, выбора маршрутов, а не взимания платы за «неправильный» выбор) может быть разработана и реализована. Эта гипотеза обеспечивает правомерность сопоставительного анализа оценок естественно-монопольных индикаторов.

В анализируемых расчетах предполагается возможность учета четырех видов внешних эффектов, зависящих от интенсивности движения автомобилей: внетранспортный эффект (порожденные выгоды от непосредственного снижения затрат пользователей автодорог), ущерб от загрязнения воздуха, шума автотранспорта и от дорожно-транспортных происшествий. Далее в расчетах внетранспортный эффект оценивается примерно в 30% от снижения затрат пользователей. Расчет ущерба от загрязнения воздуха проводится на основании Методики, утвержденной приказом

Госкомэкологии России,² исходя из пробеговых выбросов загрязняющих веществ по видам в зависимости от скорости движения автомобиля.

Экономический ущерб от выбросов загрязняющих веществ рассчитывается на основе Временной методики 1999 года.³ Так как экономическая оценка экологического ущерба зависит от уровня жизни, показатель эколого-экономической оценки удельного ущерба корректируется с учетом роста душевых доходов населения.

Оценка ущерба здоровью населения от шума автотранспорта на внегородских трассах принимается равной 0,15 руб. на 1 км пробега приведенной единицы транспорта.

Ущерб от дорожно-транспортных происшествий, как это принято в советских и российских нормативных указаниях и рекомендациях, зависит от расчетного количества ДТП на 1 млн авт.-км. Согласно рекомендациям Федерального дорожного агентства,⁴ количество ДТП должно определяться в соответствии с Инструкцией по учету потерь народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий при проектировании автомобильных дорог⁵. Однако в сравнении с 80-ми годами прошлого века уровень ДТП на 1 млн авт.-км снизился, поэтому в расчетах целесообразно применять понижающий коэффициент. При определении количества ДТП на 1 млн авт.-км учитываются различные факторы, прежде всего, количество полос движения и ширина проезжей части дорог, ширина обочин, скорость движения.

3. Анализ результатов экспериментальных расчетов естественно-монопольных индикаторов применительно к фрагменту региональной сети дорог

Результаты расчетов при разных нормах дисконта, представленные в табл. 1-4, позволяют увидеть количественные оценки различий, связанных с применением двух типов процедур субоптимизации выбора кратчайших маршрутов: по средним издержкам пользователей или по предельным системным издержкам с учетом внетранспортных экстерналий.

² «Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов», утв. приказом Госкомэкологии России №66 от 16 февраля 1999 г.

³ «Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба», утв. Госкомэкологией РФ 09.03.1999.

⁴ «Рекомендации по обеспечению безопасности движения на автомобильных дорогах» (ОДМ 218.4.005-2010), утв. распоряжением Федерального дорожного агентства от 12.01.2011 №13-р.

⁵ «Инструкция по учету потерь народного хозяйства от дорожно-транспортных происшествий при проектировании автомобильных дорог» (ВСН 3-81), утв. Минавтодором РСФСР 17.04.1981.

Табл. 1

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов (при норме дисконта 10% и распределении потоков по критерию системного равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – x_1, x_2 (кол-во поездок в год, млрд)		Экономия от структуры $SC(x_1, x_2)$	Приростные средние издержки $AIC(x_1)$	Приростные средние издержки $AIC(x_2)$	Экономия от масштаба $S(x_1, x_2)$
груз. - x_1	пас. - x_2				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,177	0,45493	0,17517	1,280
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,157	0,45499	0,17519	1,225
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,142	0,45504	0,17522	1,193
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,055	0,45624	0,17567	1,062
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,049	0,45652	0,17578	1,055
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,045	0,45679	0,17588	1,048
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,028	0,45842	0,17650	1,026
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,027	0,45870	0,17661	1,023
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,025	0,45897	0,17671	1,021
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,023	0,45951	0,17692	1,017
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,022	0,45979	0,17702	1,015
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,021	0,46006	0,17713	1,013
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,020	0,46033	0,17723	1,011

*По расчетам авторов – с использованием процедур «по предельным издержкам»

Из табл. 1,2 видно, что при норме дисконта 10% значения всех анализируемых индикаторов по процедурам указанных типов различаются незначительно, во втором или в третьем знаке после запятой. Усредненные результаты расчетов при норме дисконта 10% для системы анализируемых индикаторов и выделенных диапазонов объемов спроса проявляют однотипный характер динамики характеристик по мере роста спроса. Имеет место положительная экономия от структуры, монотонно снижающаяся в целом по всей рассматриваемой области анализа спросовых переменных (примерно на порядок), которая демонстрирует наличие эффекта естественно-монопольной синергии.

Табл. 2

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов (при норме дисконта 10% и распределении потоков по критерию пользовательского равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – x_1, x_2 (кол-во поездок в год, млрд)		Экономия от структуры $SC(x_1, x_2)$	Приростные средние издержки $AIC(x_1)$	Приростные средние издержки $AIC(x_2)$	Экономия от масштаба $S(x_1, x_2)$
груз. - x_1	пас. - x_2				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,179	0,45535	0,17621	1,283
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,159	0,45540	0,17623	1,227
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,144	0,45546	0,17625	1,194
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,056	0,45663	0,17670	1,061
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,050	0,45690	0,17680	1,054
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,045	0,45716	0,17690	1,047
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,029	0,45877	0,17751	1,023
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,027	0,45903	0,17762	1,021
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,026	0,45930	0,17772	1,018
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,023	0,45983	0,17792	1,013
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,022	0,46010	0,17802	1,011
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,021	0,46037	0,17812	1,009
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,020	0,46063	0,17823	1,007

*По расчетам авторов – с использованием процедур «по средним издержкам»

Отсутствие монотонного снижения средних приростных издержек и по грузовым, и по пассажирским перевозкам а, напротив, определенный, хотя и незначительный, их монотонный рост позволяет, исходя из выбранного способа тестирования, фиксировать факт отсутствия свойства субаддитивности общесетевых совокупных издержек, т.е. рассматриваемая транспортная сеть не является естественной монополией на рассмотренной области спроса.

Важно подчеркнуть, что во всей области анализа приводимые в табл.1,2 значения индикатора экономии от масштаба остаются больше единицы и проявляют заметное (более, чем на порядок), причем монотонное, снижение. При монотонном

Табл. 3

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов
(при норме дисконта 50% и распределении потоков по критерию системного равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – x_1, x_2 (кол-во поездок в год, млрд)		Экономия от структуры $SC(x_1, x_2)$	Приростные средние издержки $A/C(x_1)$	Приростные средние издержки $A/C(x_2)$	Экономия от масштаба $S(x_1, x_2)$
груз. - x_1	пас. - x_2				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,106	0,70634	0,28687	1,154
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,088	0,70666	0,28700	1,120
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,076	0,70699	0,28712	1,102
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,021	0,71414	0,28985	1,028
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,017	0,71577	0,29047	1,022
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,014	0,71740	0,29109	1,018
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,004	0,72716	0,29481	0,999
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,003	0,72878	0,29543	0,997
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,002	0,73041	0,29605	0,994
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,001	0,73366	0,29729	0,990
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,000	0,73529	0,29791	0,988
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	-0,001	0,73691	0,29853	0,986
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	-0,001	0,73854	0,29915	0,984

*По расчетам авторов— с использованием процедур «по предельным издержкам»

Табл. 4

Средние значения естественно-монопольных технологических индикаторов
(при норме дисконта 50% и распределении потоков по критерию пользовательского равновесия)*

Диапазоны объемов спроса – x_1, x_2 (кол-во поездок в год, млрд)		Экономия от структуры $SC(x_1, x_2)$	Приростные средние издержки $A/C(x_1)$	Приростные средние издержки $A/C(x_2)$	Экономия от масштаба $S(x_1, x_2)$
груз. - x_1	пас. - x_2				
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,114	0,71280	0,28783	1,172
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,096	0,71309	0,28794	1,136
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,083	0,71338	0,28805	1,116
6,1 - 7,6	16,0 - 20,0	0,025	0,71979	0,29050	1,034
7,6 - 9,1	20,0 - 24,0	0,021	0,72124	0,29105	1,029
9,1 - 10,7	24,0 - 28,0	0,018	0,72270	0,29161	1,024
18,3 - 19,8	48,0 - 51,9	0,007	0,73143	0,29494	1,004
19,8 - 21,3	51,9 - 55,9	0,006	0,73289	0,29549	1,001
21,3 - 22,9	55,9 - 59,9	0,005	0,73434	0,29605	0,999
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,003	0,73725	0,29716	0,995
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,002	0,73871	0,29771	0,992
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,002	0,74016	0,29827	0,990
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,001	0,74162	0,29882	0,988

*По расчетам авторов – с использованием процедур «по средним издержкам»

снижении оценки экономии от масштаба и приближении ее величины к единице сверху оно свидетельствует об эффективности производства услуг в той мере, в какой характеристикой эффективности, точнее, ее динамики в относительных единицах, могут служить затратные показатели эластичности по выпуску. По определению, индикатор экономии от масштаба соответствует обратной величине затратной эластичности по выпуску, для которой ее меньшее единицы значение указывает, что темп прироста издержек по мере роста загрузки сети отстает от динамики роста спроса.

В табл. 3,4 представлены результаты расчетов для случая существенной дефицитности инвестиций в развитие сети (норма дисконта

увеличена до 50%), что может быть вызвано как недостаточным бюджетом инвестиций, так и ошибками в формировании потенциального множества проектов на предпроектных этапах. В явном виде ограничения на бюджет инвестиций не фигурируют в модели, но косвенно учтены увеличением нормы дисконта.

Проведем краткий анализ оценок в табл. 3,4, аналогичный тому, который был выполнен для расчетных индикаторов в табл.1,2. Как и следовало ожидать, увеличение нормы дисконта, интерпретируемое при моделировании как усиление дефицитности инвестиций, приводит к заметному сужению области субаддитивности и/или к сужению области с потерей эффекта естественно-монопольной синер-

гии. Факт наличия этого эффекта идентифицируется с помощью положительных значений экономии от структуры. Напротив, исключение такого явления наблюдается в виде усредненного отрицательного значения этого индикатора в нижних строках табл. 3, при увеличении загрузки сети. Оно также могло бы свидетельствовать об уменьшении запаса субаддитивности, которое оказалось возможным увидеть при моделировании оптимальной технологии в рамках поиска системного равновесия.

Из табл. 3,4 видно, что количественные значения рассматриваемых естественно-монопольных индикаторов существенно уменьшаются по мере роста спроса (хотя и неравномерно). Визуально это можно наблюдать, например, на диаграммах поверхностей, технологических детерминант S и SC или на графиках затратных эластичностей. Причем смещения проявляются отчетливей при усилении загрузки сети (см. рис. 1 для иллюстрации изменений оценок SC при норме дисконта 50%). Эти смещения наиболее заметны для индикаторов, обладающих определенными пороговыми значениями (дополнительно к свойствам монотонности/немонотонности изменений в рассматриваемой области анализа).

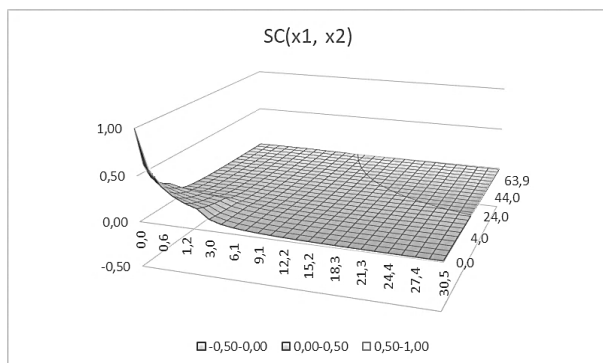


Рис. 1. Диаграмма значений экономии от структуры SC в области анализа субаддитивности общесетевой двухпродуктовой функции совокупных издержек варианта развития сети при использовании процедуры поиска системного равновесия и норме дисконта 50%

Эта особенность, относящаяся к пороговым значениям индикаторов экономии от структуры и масштаба (ноль для экономии от структуры и единица для экономии от масштаба), тоже допускает интерпретацию усиления дефицита дорогостоящих вложений в развитие сети и связана при нарушениях пороговых значений, прежде всего, с указанным выше исчерпанием запаса субаддитивности и переходом в область отрицательных значений для экономии от структуры.

Последний факт указывает на нарушение необходимого условия существования естественной монополии, что может свидетельствовать как о целесообразности – для сокращения издержек – переключения части потоков на железнодорожный транспорт, более рационального использования парка грузовых автомобилей, поиска управленческих решений за пределами сферы естественной монополии и т.п., так и необходимости пересмотра инвестиционной политики и уточнения вариантов развития полигона сети.

Заслуживают внимания и факты, связанные с появлением ряда значений, меньших единицы для количественных оценок индикатора экономии от масштаба применительно к фрагментам региональной транспортной сети с высоким уровнем загрузки. В терминах затратной эластичности подобные оценки указывают на потерю эффективности при расходовании дефицитных и дорогостоящих ресурсов: подобные оценки иллюстрируют возможность возникновения ситуаций на сети при росте спроса, в которых издержки на оптимальных технологиях начинают расти быстрее, чем объемы выпуска.

Однако было бы ошибочным делать вывод, что в таком случае дальнейшее развитие сетевой транспортной инфраструктуры необоснованно. Ведь снижение бюджета инвестиций приведет к большей их дефицитности и еще худшим значениям индикатора экономии от масштаба. Требуется дополнительный анализ не учтенных при моделировании возможностей дублирования наиболее загруженных звеньев сети, более рационального размещения предприятий и организаций, а также перераспределения бюджетных ресурсов и расширения источников финансирования.

Представляет интерес также сопоставительный анализ оценок моделируемых характеристик при выделенных значениях норм дисконта 0,1 и 0,5 (табл. 5).

Для удобства сопоставлений и усиления четкости визуализации полученных оценок представленные данные в табл. 5 сгруппированы следующим образом. В верхней половине таблицы размещаются фрагменты сравниваемых количественных оценок, которые при норме дисконта 10 и 50% выбраны последовательно для ряда небольших значений объемов спроса. Соответственно, в нижней половине таблицы представлены фрагменты сравниваемых количественных оценок, которые при норме дисконта 10 и 50% выбраны последовательно для ряда значений объемов спроса, отвечающих высокому уровню загрузки сети.

Наиболее интересными результатами расчетов представляются следующие оценки и выводы.

Табл. 5.

Сопоставление естественно-монопольных характеристик при норме дисконта 10 и 50% и распределении потоков по критерию системного равновесия*

Диапазоны объемов спроса – x_1, x_2 (кол-во поездок в год, млрд)		Экономия от структуры $SC(x_1, x_2)$	Приростные средние издержки $A/C(x_1)$	Приростные средние издержки $A/C(x_2)$	Экономия от масштаба $S(x_1, x_2)$
груз. - x_1	пас. - x_2				
При норме дисконта 10%					
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,177	0,45493	0,17517	1,280
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,157	0,45499	0,17519	1,225
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,142	0,45504	0,17522	1,193
0,9 - 1,2	2,4 - 3,2	0,130	0,45510	0,17524	1,171
При норме дисконта 50%					
0,0 - 0,3	0,0 - 0,8	0,106	0,70634	0,28687	1,154
0,3 - 0,6	0,8 - 1,6	0,088	0,70666	0,28700	1,120
0,6 - 0,9	1,6 - 2,4	0,076	0,70699	0,28712	1,102
0,9 - 1,2	2,4 - 3,2	0,067	0,70731	0,28724	1,089
При норме дисконта 10%					
22,9 - 24,4	59,9 - 63,9	0,024	0,45924	0,17682	1,019
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,023	0,45951	0,17692	1,017
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,022	0,45979	0,17702	1,015
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	0,021	0,46006	0,17713	1,013
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	0,020	0,46033	0,17723	1,011
При норме дисконта 50%					
22,9 - 24,4	59,9 - 63,9	0,002	0,73203	0,29667	0,992
24,4 - 25,9	63,9 - 67,9	0,001	0,73366	0,29729	0,990
25,9 - 27,4	67,9 - 71,9	0,000	0,73529	0,29791	0,988
27,4 - 29,0	71,9 - 75,9	-0,001	0,73691	0,29853	0,986
29,0 - 30,5	75,9 - 79,9	-0,001	0,73854	0,29915	0,984

*По расчетам авторов

Судя по значениям полученной системы оценок технологических детерминант, сохраняется вывод (как и по данным табл. 1,4) об отсутствии факта естественной монополии во всей области анализа. Свойство субаддитивности общесетевой функции издержек не подтверждается на анализируемом множестве переменных, поскольку не выполняется система необходимых и достаточных условий, принятых для выбранного способа тестирования. Выявляются диапазоны спросовых переменных,

для которых положительные значения индикатора экономии от структуры не только монотонно убывают до своего порогового значения, т.е. до нуля, но и становятся отрицательными. Нарушение необходимого условия субаддитивности улавливается только при норме дисконта 50%, причем лишь при высоком уровне загрузки сети, в завершающей области анализа.

Относительно характера изменений средних приростных издержек выявляется нарушение достаточных условий всюду в области анализа: индикаторы по каждому из двух, принятых в экспериментах, переменных демонстрируют монотонный рост вместо требуемого снижения. Факт одинакового характера динамики при количественно разных значениях моделируемых оценок имеет место при любой норме дисконта для любого внутреннего фрагмента области анализа спросовых переменных. Но этот вывод не сохраняется при переходе из области с начальным, низким уровнем загрузки сети к граничной, завершающей области значений исходных спросовых переменных, в которой наблюдается высокий уровень загрузки сети. При этом количественно значения оценок приростных средних издержек практически совпадают при норме дисконта 10% и для начального, и для завершающего фрагментов области анализа, но существенно различаются и становятся примерно в 1,5 раза выше при переходе от начальной области к области с высоким уровнем загрузки. Представляется интересным выделить (по данным табл. 5) момент, иллюстрирующий проявления изменчивости взаимосвязей оценок экономии от масштаба и экономии от структуры, а также выявить сферы изменения значений индикатора экономии от масштаба, формально не связанного, как показано в теории, с установлением наличия свойства субаддитивности многопродуктовой общесетевой функции издержек.

Присущим сетевой транспортной инфраструктуре свойством зачастую считается наличие растущей экономии от масштаба ($S > 1$). Более того, не принимается во внимание доказанный в теории факт, что естественно-монопольные свойства не должны быть связаны со снижением количественных оценок экономии от масштаба, а переход за границу значений, меньших единицы, не обязательно соответствует потере статуса естественной монополии, т.е. отрицательным значениям экономии от структуры. В действительности такие представления являются ошибочными. Они опровергаются в теории в общем виде, и приводимые в статье примеры конкретных вычислительных экспериментов подтверждают несостоятельность подобных суждений.

При этом еще раз отметим, что количественные оценки, заметно превышающие единицу в начале области анализа и соответствующие сфере эффективной работы и развития сети, когда рост издержек отстает от динамики выпуска, выражаются через значения растущей экономии от масштаба, только когда всюду в области анализа этот индикатор, оставаясь больше единицы, монотонно снижается, приближаясь к своему пороговому значению, т.е. к единице, сверху.

Расчеты показывают, что такие результаты могут иметь место и при разных значениях нормы дисконта, и в различных фрагментах области анализа. Однако результаты, приведенные в нижней части табл.5, отвечающие фрагменту с высоким уровнем загрузки сети при норме дисконта 50%, иллюстрируют ситуацию, для которой характерны меньшие единицы значения падающей экономии от масштаба ($S < 1$) в сочетании как с неотрицательными (положительными и нулевыми), так и отрицательными значениями экономии от структуры. Этот момент особенно интересен тем, что неотрицательные значения экономии от структуры, свидетельствующие о наличии эффекта естественно-монопольной синергии, и, возможно, о наличии факта естественной монополии, имеют место не только при растущей экономии от масштаба, но и при падающей.

Другими словами, область потенциальной субаддитивности может быть объемнее по исходным спросовым характеристикам, чем область растущей экономии от масштаба, и содержать фрагменты с падающей экономией. Аналитически этот факт проявляется четко лишь для однопродуктового случая, в котором полное тестирование на субаддитивность, например, простейшей квадратичной функции издержек (со свободным членом, имитирующем условно-постоянные составляющие издержек для краткосрочной функции) в точности совпадает с проверкой положительных значений экономии от структуры.

В целом данные табл. 1-5 иллюстрируют возможность появления отрицательного значения индикатора экономии от структуры при решении задачи диагностики, т.е. показывают, что рассматриваемая транспортная сеть региона, отвечающая условиям соответствующей постановки, не всегда обладает свойствами естественной монополии. С ростом нагрузки на сеть запас субаддитивности исчерпывается, и экономия от структуры, постепенно снижаясь, становится меньше нуля. Такое нарушение необходимого условия субаддитивности общесетевой функции издержек свидетельствует о целесообразности структурных и организационных преобразований по ослаблению режимов перегру-

женности сети (например, снятие части нагрузки и передаче ее конкурирующим перевозчикам, поиск неучтенных возможностей изменения конфигурации сети). Также наблюдается рост средних природных издержек и заметное снижение экономии от масштаба. Этим примером экспериментально подтверждается указанный в теории естественной монополии, но малоизвестный в управленческой практике факт, что сетевые транспортные подсистемы с естественно-монопольным компонентом могут характеризоваться не только растущей, но и постоянной или даже падающей экономией от масштаба.

Заключение

Полученные результаты могут рассматриваться как развитие методологии моделирования оценки системной эффективности сетевой транспортной инфраструктуры [16,18]. Применительно к фрагменту региональной транспортной сети формируется современный теоретико-прикладной подход к выявлению ее естественно-монопольных свойств посредством расчетных конструкций, специально разрабатываемых для оценки эффекта естественно-монопольной синергии. Представленные примеры построения прикладных моделей и анализ получаемых количественных оценок показывают возможности предлагаемой методологии, которая аккумулирует и развивает накопленный в теории и частично освоенный мировой практикой опыт решения задач нормативной идентификации при различных их постановках. Эти результаты могут быть использованы в целях развития российской системы госрегулирования в рассматриваемой сфере и повышения обоснованности принимаемых управленческих решений по структурным преобразованиям. Итоги представленных исследований и разработок могут стать основой для формирования пакета предложений по использованию создаваемого теоретико-прикладного модельного инструментария в современных информационно-аналитических системах обоснования и поддержки принимаемых управленческих решений по развитию сетевых инфраструктурных объектов.

Литература

1. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. Моделирование оценок перегруженности транспортной сети и вариантов ее развития // Экономический анализ: теория и практика. 2013. № 48 (351). С. 16-23.
2. Белоусова Н.И., Васильева Е.М. Диагностика свойств сетевых инфраструктурных технологий

- в реформируемой системе госрегулирования российских естественных монополий // Российский экономический журнал. 2019. № 3. С.25-35. doi: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35.
3. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Васильев В.Б. Естественные монопольные свойства транспортных сетей: многопродуктовые модели диагностики // Аудит и финансовый анализ. 2018. № 2. С.129–147.
 4. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика. 5-ое изд. перераб. и доп. М.: Поли Принт Сервис. 2015. С.1300.
 5. Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ. 1982. 497 p.
 6. Белоусова Н.И., Васильева Е.М., Лившиц В.Н. Модели идентификации естественных монополий и государственного управления ими (возможности расширения классической теории) // Экономика и математические методы. 2012. № 48(3). С. 64-78.
 7. Pulley L.B. A composite cost function for multiproduct firms with an application to economies of scope in banking // The Review of Economics and Statistics. 1992. V. 74. P. 221-230.
 8. Roller L.H. Proper quadratic cost functions with an application to the Bell System // The Review of Economics and Statistics. 1990. V. 72. P. 202-210.
 9. Gasmi F., Laffont J.-J., Sharkey W. The natural monopoly test reconsidered: an engineering process – based approach to empirical analysis in telecommunications // International J. of Industrial Organization. 2002. V. 20. P. 435–459.
 10. Kantorovich L.V. (1939). Mathematical methods in the organization and planning of production. Publication house of the Leningrad University; Translated in: Management Science. 1960. N 6. P. 366-422.
 11. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учебное пособие / А.В. Гасников и др. Под ред. А.В. Гасникова. М.: МЦНМО. 2013.
 12. Steenbrink Peter A. Optimization of Transport Networks. L., N.Y., Sydney, Toronto/ Ed. JohnWiley&Sons, 1974 (Стенбринк П. Оптимизация транспортных сетей. Пер. с англ. М.: Транспорт, 1981).
 13. Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Livchits V.N. Optimization Transport Computations. In: Advances in Economics and Optimization: collected scientific studies dedicated to the memory of L.V.Kantorovich/ David Wing-kay Yeung ed. N.Y.: Nova Science Publishers Inc. 2014. P.19-36.
 14. Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные сетевые транспортные задачи. М.: Транспорт. 1972. С.144.
 15. Лившиц В.Н. О применении математических методов при выборе оптимальной схемы развития транспортной сети. Труды Первой Всесоюзной конференции по оптимизации и моделированию транспортных сетей. Киев: Изд-во Института кибернетики АН УССР. 1967. С. 45-64.
 16. Белоусова Н.И., Васильева Е.М., Лившиц В.Н., Миронова И.А. Концептуальные основы моделирования оценки системной эффективности развития сетевой транспортной инфраструктуры // Труды ИСА РАН. 2021. № 71(1). С. 10–21. doi: 10.14357/20790279210102.
 17. Бушанский С.П. Неэффективность дорожных концессий в России: исключение и правило // Журнал Новой экономической ассоциации. 2021. № 2(50). С. 97-118.
 18. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. О направлениях вариативного анализа нормативной идентификации естественных монопольных свойств региональной транспортной сети / Стратегическое планирование и развитие предприятий: материалы XXIV Всероссийского симпозиума. Москва, 11–12 апреля 2023 г. / под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. М.: ЦЭМИ РАН. 2023. С.304-309. doi: 10.34706/978-5-8211-0814-2-s2-09. EDN: UCZPRR.

Белоусова Наталия Ивановна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Доктор экономических наук. Область научных интересов: естественные монополии, методология системной оценки. E-mail: natabel.52@mail.ru; belousova@isa.ru

Васильева Елена Михайловна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Ведущий научный сотрудник. Доктор экономических наук. Область научных интересов: оптимизация транспортной сети, идентификация естественной монополии. E-mail: vas10081946@gmail.com; vasilieva@isa.ru (Ответственный за переписку).

Лившиц Вениамин Наумович. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Главный научный сотрудник. Доктор экономических наук, профессор. Область научных интересов: анализ и оценка эффективности инвестиционных проектов. E-mail: livchits@isa.ru

Миронова Инна Алексеевна. Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН, г. Москва. Главный специалист. Кандидат экономических наук. Область научных интересов: теория и практика оценки эффективности инвестиционных проектов. E-mail: makbat@mail.ru

Бушанский Сергей Петрович. Центральный экономико-математический институт РАН, г. Москва. Старший научный сотрудник. Кандидат экономических наук. Область научных интересов: разработка методов построения оптимальных транспортных сетей, исследование проблем обоснования крупных инфраструктурных проектов, моделирование процессов принятия решений в системе государственного проектирования. E-mail: ergr190@rambler.ru

Modeling the efficiency system assessment for the development of network transport infrastructure

N.I. Belousova¹, S.P. Bushansky^{II}, E.M. Vasilieva¹, V.N. Livchits¹, I.A. Mironova¹

¹ Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{II} Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The purpose of the article is modeling the efficiency system assessment of network infrastructure subsystems development and identifying their natural monopoly properties. Methods and models of natural monopoly theory, nonlinear network transport projection and variation analysis are used. The spectrum of models for identifying the natural monopoly properties of the network transport infrastructure, corresponding to changes in the parameters of the total cost functions, has been researched. Applying to modeling the development of fragments of regional transport network, computational algorithms for efficiency system assessment have been elaborated. The influence of the effect of natural monopoly synergy as the sphere of positive values of the economy of scope based on subadditivity testing for cost function has been specified. The results of calculations are presented related both specifying the assessment methodology under diagnostics of natural monopoly properties (primarily using special extensions of algorithms for finding the optimal transportation technology), and with modifications of computational experiments and quantitative assessment with variations of the factors.

Keywords: *network transport infrastructure, system efficiency, natural monopoly indicators/ technology determinants, formulation of the diagnostics problem, testing the subadditivity of cost function, extra-urban road network, system and user equilibrium, variation of rate of return, cost elasticity*

DOI: 10.14357/20790279230308

References

1. Belousova N.I., Bushansky S.P., Vasilieva E.M. Modeling assessment of transport network congestion and options for its development. *Ekonomicheskij analiz: teoriya i praktika*. 2013; 48 (351):16-23 (In Russ.).
2. Belousova N.I., Vasilieva E.M. Diagnostics of network infrastructure technologies properties under reforming the system of Russian natural monopolies state regulation. *Rossiiskij ekonomicheskij zhurnal*. 2019; 3: 25-35. (In Russ.). doi: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35.
3. Belousova N.I., Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Vasiliev V.B. Natural monopoly properties of transport networks: multiproduct models of diagnostics. *Audit i finansovyy analiz*. 2018; 2:129–147. (In Russ.).
4. Vilensky P.L., Livchits V.N., Smoljak S.A. Efficiency Assessment of Investment Projects: Theory and Practice. 5th ed. Moscow: Poly Print Service; 2015. 1300 p. (In Russ.).
5. Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ; 1982. 497 p.
6. Belousova N.I., Vasilieva E.M., Livchits V.N. The models of natural monopolies identification and state regulation (possibilities of extension of classical theory). *Ekonomika i matematicheskie metody*. 2012; 48. (3):64-78 (In Russ.).
7. Pulley L.B. A composite cost function for multiproduct firms with an application to economies of

- scope in banking. The Review of Economics and Statistics. 1992; 74: 221-230.
8. *Roller L.H.* Proper quadratic cost functions with an application to the Bell System. The Review of Economics and Statistics. 1990; 72: 202-210.
 9. *Gasmi F., Laffont J.-J., Sharkey W.* The natural monopoly test reconsidered: an engineering process – based approach to empirical analysis in telecommunications. International J. of Industrial Organization. 2002; 20: 435–459.
 10. *Kantorovich L.V.* (1939). Mathematical methods in the organization and planning of production. Publication house of the Leningrad University; Translated in: Management Science. 1960; 6: 366-422.
 11. Introduction to Mathematical Modeling of Traffic Flows / A.V.Gasnikov etc. / Gasnikov A.V. (ed.). Moscow: MCNMO; 2013. (In Russ.).
 12. *Steenbrink Peter A.* Optimization of Transport Networks. L., N.Y., Sydney, Toronto/ Ed. JohnWiley&Sons, 1974.
 13. *Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Livchits V.N.* Optimization Transport Computations. In: Advances in Economics and Optimization: collected scientific studies dedicated to the memory of L.V.Kantorovich/ David Wing-kay Yeung ed. (Economic issues, problems and perspectives). Nova Science Publishers Inc. N.Y. 2014. P.19-36.
 14. *Levit B.U., Livchits V.N.* Nonlinear Network Transport Problems. Moscow: Transport; 1972. 144 c. (In Russ.).
 15. *Livchits V.N.* On the application of mathematical methods under choosing the optimal scheme for transport network development. In: Proceedings of the First All-Union Conference on optimization and modeling of transport networks. Kiev: Publishing House of the Institute of Cybernetics of AC USSR. 1967. P. 45-64. (in Russ.).
 16. *Belousova N.I., Vasilieva E.M., Livchits V.N., Mironova I.A.* Conceptual basis of modeling the system efficiency for network transport infrastructure development. Trudy Instituta Sistemnogo Analiza Rossiyskoy Akademii Nauk (ISA RAN). 2021; 71(1):10–21 (In Russ.). doi: 10.14357/20790279210102.
 17. *Bushansky S.P.* Inefficiency of road concessions in Russia: exceptions and rules ZHurnal Novoj ekonomicheskoy asociacii.2021; 2(50): 97-118. (In Russ.).
 18. *Belousova N.I., Bushansky S.P., Vasilieva E.M.* On the directions of normative identification of natural monopoly properties of regional transport network. In: Kleiner G.B. (ed.). Strategy planning and development of enterprises. Proceedings of the XXIV All-Union Symposium. 11-12 April 2023. Moscow: CEMI RAS. 2023. P.304-309. (in Russ.). doi: 10.34706/978-5-8211-0814-2-s2-09. EDN: UCZPRR.

Belousova N. Leading Researcher, Doctor (Economy), Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: natabel.52@mail.ru; belousova@isa.ru

Vasilieva E. Leading Researcher, Doctor (Economy), Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: vas10081946@gmail.com; vasilieva@isa.ru

Livchits V. Chief Research Officer, Doctor (Economy), Professor, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: livchits@isa.ru

Mironova I. Chief Specialist, PhD in Economics, Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: makbat@mail.ru

Bushansky S. Phd (Economics), Senior Researcher, Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: dbd-s@yandex.ru