

Моделирование характеристик деятельности отраслевых и региональных подсистем

Экономико-математические модели диагностики перегруженности транспортной сети*

С. Н. Гук

Аннотация. В статье рассматриваются способы моделирования оценок эффективности деятельности транспортных сетей как естественных монополий в условиях роста спроса на перевозки. В основу моделей диагностики перегруженности сети положена концепция субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек как характеристики способов организации и взаимодействия корреспонденций по кратчайшим (в смысле минимальных затрат) маршрутам, определяемым в результате нелинейной оптимизации распределения потоков.

Сравниваются результаты компьютерного моделирования соответствующих технологических детерминант — экономии от масштаба и структуры — параметрическим (эконометрическим) и непараметрическим способом для конкретной сети автомобильных дорог региона. Показано, что для сетей, работающих в условиях растущего спроса на перевозки, полезным инструментом при отборе вариантов развития сети могут служить модели анализа естественно-монопольных свойств сети и, в том числе, предлагаемые модели экономических оценок деятельности сетевых транспортных подсистем, специально ориентированные на учет фактора перегруженности сетей.

Ключевые слова: *методы оценки эффективности транспортной сети, концепция субаддитивности, сетевые транспортные подсистемы.*

В условиях роста пассажиро- и грузооборота возникают перегрузки существующих транспортных сетей и в таких режимах сеть работает зачастую со

значительным снижением эффективности, перерасходом издержек на транспортировку. Для исключения (или ослабления в экономически рациональных пределах) подобных режимов требуются значительные инвестиции, при оценке эффективности которых — с позиций системного анализа — необходимо

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект 12-02-00119).

рассмотрение не какого-то одного, возможно, экспертно заданного, проекта, а целого набора различных сетевых инвестиционных проектов. Спектр вариантов может быть весьма широк, и для обоснованного его сужения требуются дополнительные методики. Цель данной статьи — показать, что полезным инструментом при выборе варианта развития сети могут служить модели анализа естественно-монопольных свойств сети и, в том числе, модели экономических оценок деятельности сетевых транспортных подсистем, специально ориентированные на учет фактора перегруженности сетей.

Эти оценки направлены на установление факта наличия (или отсутствия) дополнительной экономии издержек производства услуг, которая при эффективной организации характерна для сетевых технологий, и предназначены для выявления эффекта синергии, выражаемого через свойство субаддитивности общесетевой функции издержек $C(y)$ [2], или диагностики его отсутствия. Напомним, что согласно теории, субаддитивностью издержек, обладают естественные монополии, в частности, целостные сети, которые по технологическим и иным социально-экономическим причинам нецелесообразно разделять на несколько подсетей (а, напротив, имеет смысл усиливать и развивать, увеличивая разветвленность, плотность сети и т. п.). Соответственно, величина издержек на транспортировку и развитие, рассчитываемая при оптимальных режимах использования ресурсов, минимальна.

В основу моделей оценок деятельности транспортной сети и ее работы в условиях перегруженности положена сетевая концепция субаддитивности как характеристики способов организации и взаимодействия корреспонденций по кратчайшим (в смысле минимальных издержек) маршрутам. Нарушение субаддитивности при резком росте затрат в связи с увеличением загрузки трактуется как показатель перегруженности сети, и неэффективной ее работы, наличия «пробок», слабой разветвленности, недостатка параллельных маршрутов и замкнутых контуров; может трактоваться как необходимость подключения сетей других (конкурирующих) видов транспорта, создания дублирующих фрагментов сети.

Тестирование общесетевой функции издержек на субаддитивность предусматривает расчеты технологических детерминант, причем по теории — на основе информации об оптимальных режимах деятельности компании с позиции минимизации совокупных издержек. Такие данные, как правило, не являются наблюдаемыми, и в прикладных целях требуемую информацию приходится моделировать специально. Для транспортных сетей — при соответствующей вариации параметров по спросу на перевозки и объемам инвестиций в развитие сети — возможности генерации требуемых данных обеспечивает информационная технология синтеза сложных сетевых

структур (IT-S) [3], поскольку она направлена именно на оптимизацию сетевой технологии. Программный комплекс, основанный на IT-S, позволяет в результате вариантных расчетов получать итоговые затратные характеристики оптимизируемой сетевой технологии, которые соответствуют различным фиксированным объемам спроса на перевозки, объемам тонно-километровой работы по кратчайшим маршрутам, а также варьируемым значениям уровней цен на используемые ресурсы. При этом для построения специальных индикаторов наличия естественно-монопольных свойств сети и эффекта синергии (или его отсутствия в условиях перегруженности) используются агрегированные оценки эффективности типа экономии от масштаба (S) и экономии от структуры (SC). Содержательно индикатор экономии от масштаба позволяет сопоставлять динамику роста совокупных издержек с динамикой спроса, а индикатор экономии от структуры в рассматриваемом однопродуктовом случае по сути совпадает с характеристикой субаддитивности функции издержек.

Эксперименты по моделированию характеристик и расчеты проводились на реальной дорожной сети, состоящей из 40 звеньев и 35 узлов [4].

Общесетевая агрегированная функция издержек строилась как с использованием непараметрического подхода, когда считается, что по генерируемым данным функция задается таблично, так и параметрического — с использованием эконометрического подхода.

Если проанализировать фазовую область (Q, K) вариантных расчетов чистого дисконтированного эффекта $NPV = NPV(Q, K)$ для разных объемов спроса Q на перевозку некоторого обобщенного вида продукта (аккумулирующего поездки грузовых и пассажирских транспортных средств), которые должны быть выполнены с учетом того или иного объема инвестиций K на развитие сети, то расчеты показывают следующее. Судя по соответствующим значениям S (табл. 1) — вопреки распространенным представлениям о транспортных сетях — существуют области, где экономия от масштаба становится падающей: совокупные издержки растут быстрее, чем спрос на перевозки и, возможно, сеть при анализируемой топологии утрачивает характеристические свойства естественной монополии как оптимального способа организации перевозок. Это в рамках принятой методологии расчетов означает, что хотя сеть и «справляется» с перевозками, но перегружена. Возможно, что рационально увеличить плотность сети и создать дублирующие маршруты, а в предельном случае — и продублировать сеть полностью, если перерасход дополнительных на строительство дублирующей сети инвестиций будет скомпенсирован экономией издержек при ее эксплуатации.

Эффект исчезновения естественно-монопольной синергии — можно уловить с помощью показателя

Таблица 1

Дискретный аналог экономии от масштаба S

Инвестиции, млрд руб. Спрос, млн поездок ⁱⁱ	без огр.	24	16	8	4	2	1	0,5
0,4–20,0	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93	3,93	3,92
20,1–39,0	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,35	1,27	0,66
39,1–58,0	1,02	1,02	1,02	1,02	1,07	0,69	0,72	0,34
173,1–193,0	0,99	0,99	0,45	0,29	0,35	0,37	0,38	0,51
193,1–212,0	0,97	0,90	0,46	0,39	0,36	0,39	0,40	0,52

Таблица 2

Дискретный аналог экономии от структуры SC

Инвестиции, млрд руб. Спрос, млн поездок	без огр.	24	16	8	4	2	1	0,5
0,4–20,0	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
20,1–39,0	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,30	0,11
39,1–58,0	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,11	–0,34
173,1–193,0	0,08	0,09	–0,02	–0,35	–0,48	–0,42	–0,49	–0,42
193,1–212,0	0,09	0,09	–0,12	–0,44	–0,49	–0,44	–0,49	–0,41

SC , при том, что только положительные его значения отвечают однопродуктовой естественной монополии. Расчеты для указанного предельного случая показывают, что имеют место как положительные значения SC , причем в области, более широкой, чем область, идентифицируемая значениями $S > 1$, но и отрицательные значения SC , где $S < 1$, что вполне согласуется с теорией естественной монополии. Соответствующие значения SC приведены в табл. 2.

Аналогичные оценки деятельности транспортных сетей в режимах перегруженности были получены и с использованием эконометрического моделирования, при этом для построения специальных индикаторов наличия естественно-монопольных свойств сети так же использовались агрегированные оценки эффективности типа экономии от масштаба (S) и экономии от структуры (SC).

Для построения эконометрических моделей агрегированной общесетевой функции издержек использованы данные, полученные путем компьютерного моделирования работы и развития сети с нелинейными характеристиками. Соответствующий инженерный подход реализован на базе информационной технологии синтеза сложных сетевых структур (IT-S)[3]. На базе полученного массива исходных данных для каждого сценария развития сети было проведено эконометрическое моделирование агрегированной общесетевой однопродуктовой функции издержек, исходя из квадратичных форм вида:

$$C(y) = F + ay^2 \text{ для } y > 0.$$

Данная форма была выбрана после визуального изучения графиков генерируемых, с помощью IT-S, исходных данных, которые по виду ближе всего к квадратичным параболам, и пробного эконометрического моделирования.

При моделировании развития сети в приводимых далее расчетах рассматриваются два варианта схем этапного развития ее элементов — отдельных автодорог. Первый — многоэтапный (по количеству полос) скачкообразный переход к дорогам с покрытием более высокого качества (называемый более инновационным), когда при развитии (независимо от количества полос) сразу предусматривается строительство дороги с покрытием, соответствующим высшей (I) категории. Второй вариант, в котором предусматривается последовательный (также многоэтапный по количеству полос) переход от дорожного покрытия более низких категорий к нормативам первой категории (вариант, называемый менее инновационным). Для каждого варианта развития сети рассматривается набор сценариев, 10 для более инновационного и 9 для менее инновационного, различающиеся различными ограничениями на объем инвестиций (см. первый столбец в табл. 3 и табл. 4).

Восстановленная на основе моделирования функция издержек для варианта со скачкообразным развитием дорог до высокого качества, при отсутствии

Таблица 3

Параметры моделей квадратичных функций издержек при различных уровнях инвестиций
(более инновационный вариант)

Сценарий развития (ограничения на объем инвестиций, млрд руб.)	F	A	Граница области субаддитивности, млн поездок в год
нет инвестиций (сценарий нулевого развития)	2001090	6.07E-09	25.7
0.05	3094464	6.07E-09	25.7
0.1	2001090	5.88E-09	32.4
1	3664641	2.40E-09	35.6
2	4142190	1.83E-09	67.2
4	3831402	1.44E-09	72.9
8	5966606	9.2E-10	113.9
16	8727651	4.25E-10	202.7
24	9942458	2.76E-10	268.3
нет ограничений на инвестиции (сценарий наибольшего развития)	9984612	2.73E-10	270.7

Таблица 4

Параметры моделей квадратичных функций издержек при различных уровнях инвестиций
(менее инновационный вариант)

Сценарий развития (ограничения на объем инвестиций, млрд руб.)	F	A	Граница области субаддитивности, млн поездок в год
нет инвестиций (сценарий нулевого развития)	3105489	6.05E-09	22.6
0.05	523988	6.00E-09	19.1
0.1	2177702	5.98E-09	9.3
1	1692452	2.5E-09	26.0
2	192821	2.22E-09	9.3
4	2317454	1.49E-09	39.5
8	5153197	9.38E-10	74.1
16	8722230	4.07E-10	146.4
нет ограничений на инвестиции (сценарий наибольшего развития)	9467037	3.21E-10	171.7

дополнительных инвестиций в развитие сети развития сети, имеет вид:

$$C(y) = 2001090 + 6,07 \cdot 10^{-9} y^2.$$

С использованием программных средств пакета Eviews для каждого сценария восстановлена общесетевая функция издержек, параметры которой для удобства анализа представлены в таблицах. Так, в табл. 3 приведены основные параметры F и a , полученные при моделировании в Eviews квадратичных функций издержек при различных сценариях более инновационного варианта развития сети (от сценария нулевого развития «без инвестиций» до сценария наибольшего развития «без ограничения на инвестиции») и в табл. 4 приведены аналогичные результаты для сети дорог с менее инновационным развитием. Параметр F в этих таблицах для удобства анализа скорректирован на начальную стоимость представленной автодорожной сети.

Как и ожидалось, с ростом вложений в развитие сети (увеличением объема инвестиций) параметр F (условно-постоянные издержки) растет, а параметр a при квадратичном члене (отражающий изменение переменных издержек) падает, что свидетельствует о замедлении роста издержек, а также, согласно теории, о расширении области субаддитивности отраслевой функции издержек. Преимущественно такой характер носят расчетные данные в правом столбце табл. 3 и табл. 4, указывающие границу области субаддитивности моделируемой функции издержек, а, значит, и область естественной монополии для данной сети. Детальнее характеристики области субаддитивности будут рассмотрены ниже.

Значения технологического детерминанта S , были рассчитаны исходя из построенной функции издержек, для всех варьируемых объемов выпуска — спроса на перевозки по данной автодорожной сети (от 0,4 до 231 млн поездок в год) по следующей модели:

$$S = \frac{AC}{MC} = \frac{\frac{F}{y} + ay}{2ay} = \frac{F}{2ay^2} + \frac{1}{2}.$$

Выбранный технологический детерминант, как известно, строго идентифицирует область субаддитивности в однопродуктовом случае только при значениях $S > 1$, допускает область субаддитивности в некотором диапазоне $S < 1$, но может служить для оценки эффективности работы сети в терминах изменений затратной эластичности по выпуску.

Анализ полученных результатов, показывает, что для дорог с покрытием более высокого качества (более инновационный вариант) для всех возможных сценариев развития сети наблюдается область с $S > 1$. При этом для сценариев при 24 млрд руб. и «без ограничения на инвестиции» область с $S > 1$ заканчивается в районе 120 млн поездок в год, и составляет примерно 50 % от максимальной загрузки сети.

Для сценария 16 млрд руб. область, в которой S превышает единичное значение, заканчивается в районе 80 млн поездок в год, что составляет примерно 35 % от максимальной нагрузки на сеть; для остальных сценариев от 8 млрд руб. до сценария нулевого развития «без инвестиций» область, в которой S превышает единичное значение, постепенно снижается от 30 до 20 млн поездок в год, что составляет около 10–15 % от максимальной нагрузки на сеть.

Аналогично для дорог с покрытием обычного качества (менее инновационный вариант) для всех возможных сценариев развития сети наблюдается область с $S > 1$. При этом для сценария «без ограничения на инвестиции» область с $S > 1$ заканчивается также в районе 120 млн поездок в год, и составляет примерно 50 % от максимальной загрузки сети.

Именно в указанной выше области, где технологический детерминант S превышает единичное значение или близок к нему, можно предполагать выполнение естественно-монопольных свойств, сохранение или незначительное нарушение формального условия субаддитивности агрегированной общесетевой функции издержек.

Проведенный анализ показывает, что более развитая сеть (с большим объемом вложенных инвестиций, в том числе, возможно, и на создание некоторых резервов пропускной способности) в заметно большей области будет обладать растущей экономией от масштаба и оставаться устойчивой естественно-монопольной. При этом, как показывают результаты расчетов, загрузка хорошо развитой сети может не приводить к потере естественно-монопольных свойств в достаточно широкой области.

Для анализа естественно-монопольных свойств сети в области, в которой S уже не принимает значение большее единицы, но при этом стабилизируется в районе 0,5 необходимо обратиться либо к анализу

технологического детерминанта SC — экономии от структуры, положительное значение которого в однопродуктовом случае однозначно идентифицирует естественную монополию. Здесь уместно напомнить, что, несмотря на сложность идентификации естественной монополии в общем случае, когда требуется тестирование значений целой системы технологических детерминант и анализ их динамики, в данном случае, когда моделирование ограничено обоснованным выбором данной функциональной формы, имеется возможность упрощенного аналитического определения области субаддитивности.

Действительно, если функция затрат выпукла и имеет вид $C(y) = F + ay^2$ для $y > 0$, нетрудно показать, что кривая средних издержек имеет U-образный вид: снижается при $0 < y < \sqrt{F/a}$ и возрастает при $y > \sqrt{F/a}$, однако, эта функция затрат остается субаддитивной в большей области, до $y = \sqrt{kF/a}$.

Данное граничное значение легко вычисляется, если учесть, что при любом количестве k фирм в отрасли имеет место соотношение

$$kC(y/k) = kF + ay^2/k > F + ay^2$$

для любых $y < \sqrt{kF/a}$.

Результаты расчетов границ области субаддитивности, исходя из соответствующих параметров эконометрической модели агрегированной общесетевой функции издержек для различных сценариев развития сети и вариантов модернизации ее звеньев, приведенные ранее в табл. 3 и табл. 4, представлены также и в виде графиков. Так, на рис. 1 можно наблюдать изменения области субаддитивности для первого (более инновационного) варианта развития сети в зависимости от объема вложенных в развитие сети инвестиций, а на рис. 2 приведен аналогичный график для второго (менее инновационного) варианта.

Визуальный анализ приведенных графиков позволяет интерпретировать полученные результаты следующим образом. В целом характер расширения области субаддитивности (в данном однопродуктовом случае области положительных значений экономии от структуры SC) соответствует изменениям экономии от масштаба S , и конфигурация области с нарушением субаддитивности, где $SC < 0$ и исчезают свойства естественной монополии, почти повторяет очертания выделенной при анализе S области неэффективности, где S меньше единицы. Необходимо отметить, что полученные результаты расчетов также хорошо согласуются с теорией, согласно которой область субаддитивности по суммарной загрузке сети может быть шире области, в которой имеет место растущая экономия от масштаба, т. е. $S > 1$, и, следовательно, естественная монополия сохраняется и в некоторой большей области при $S < 1$.

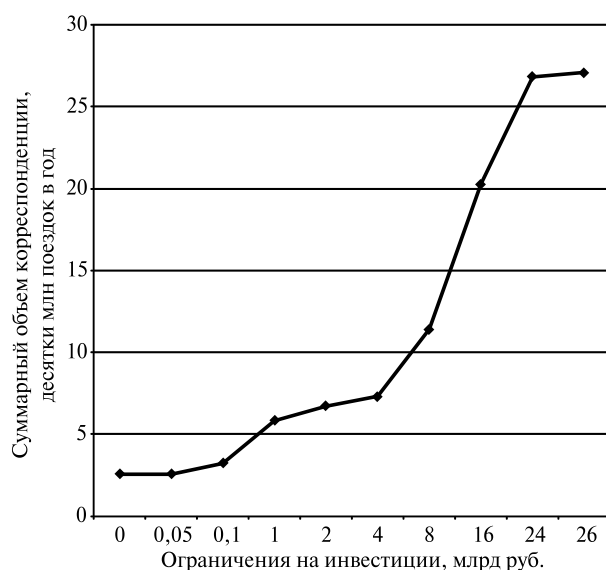


Рис. 1. Зависимость границы области субаддитивности от объемов выделяемых на развитие сети инвестиций (более инвестиционный вариант)

Если сравнить результаты полученные для различных вариантов, то видно, что область субаддитивности для второго варианта развития сети (дороги с обычным покрытием) получается более узкой и расширяется медленнее в зависимости от объема вложенных в развитие сети инвестиций. Подчеркнем, что первый вариант является более инновационным, и полученные результаты подтверждают — развитие звеньев до состояния более дорогих дорог (с покрытием лучшего качества) позволяет сократить условно-постоянные издержки и создать некоторый резерв пропускной способности для представленной автодорожной сети, благодаря более высокому классу технического состояния её элементов. Как следствие, полученная сеть, в большей области сохраняет естественно-монопольные свойства.

Анализ экономии от масштаба показывает, что при эконометрическом моделировании зона эффективности, где $S > 1$ получается заметно меньше, несмотря на сохранение общих тенденций. Так, экономия от масштаба при обоих способах расчета имеет одинаковый характер для сценария развития с ограничением на инвестиции в 24 млрд рублей и без ограничений для более инновационного варианта.

В целом можно отметить, что оба приведенных способа расчета технологических детерминант, практически одинаково (в пределах погрешности) определяют границы области варьируемых объемных (спросовых и инвестиционных) показателей, в которой

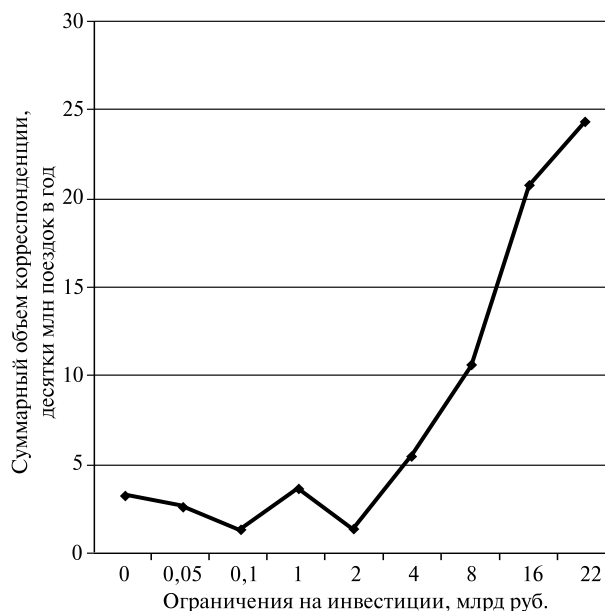


Рис. 2. Зависимость границы области субаддитивности от объемов выделяемых на развитие сети инвестиций (менее инновационный вариант)

сохраняются (или нарушаются из-за перегруженности) свойства естественной монополии и могут быть использованы при оптимизации развития транспортной сети в условиях перегруженности.

Литература

1. Белоусова Н. И., Бушанский С. П., Васильева Е. М. Экономические оценки развития транспортных сетей с учетом условий их перегруженности. Россия: тенденции и перспективы развития. Ежегодник. Вып. 6. Часть 1. М.: ИНИОН РАН, 2011. С. 664–667.
2. 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. Т. 48. № 3. С. 64–78.
3. Белоусова Н. И., Бушанский С. П., Васильева Е. М., Лившиц В. Н., Позамантир Э. И. Информационная технология синтеза сложных сетевых структур нестационарной российской экономики: модели, алгоритмы, программная реализация // Аудит и финансовый анализ. М.: ЗАО «ІС: Компьютерный Аудит». Вып. 1, 2008. С. 50–88.
4. Лившиц В. Н., Белоусова Н. И., Бушанский С. П., Васильева Е. М., Гук С. Н. Анализ динамики технологических детерминант естественно-монопольных транспортных сетей при оптимальном их развитии. Аудит и финансовый анализ, М., «ДСМ Пресс», 2011. Вып. 4. С. 138–159.

Гук Сергей Николаевич. Аспирант ИСА РАН. Окончил в 2010 г. МФТИ. Кол-во печатных работ: 31. Область научных интересов: моделирование функций издержек сетевых инфраструктурных подсистем. E-mail: sergei.gook@gmail.com