

# Системная диагностика социально-экономических процессов

## О разработке информационной и модельной базы обоснований сетевых естественно-монопольных технологий

Н.И. Белоусова<sup>I</sup>, С.П. Бушанский<sup>II</sup>

<sup>I</sup> Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, г. Москва, Россия

<sup>II</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Центральный экономико-математический институт» Российской академии наук, г. Москва, Россия

**Аннотация.** Исследуются проблемы формирования множества целесообразных с позиций технологии и организации вариантов развития сетевой транспортной инфраструктуры с использованием инструментария теории естественной монополии. Предлагаемые схемы информационных и модельных взаимосвязей позволяют корректировать конфигурацию транспортных сетей при вариации спроса с учетом естественно-монопольных свойств. На основе обобщения опыта моделирования и экспериментальных расчетов выполнен анализ факторов, выявление зависимости от которых имеет первоочередной характер влияния на качество управленческих решений. Приведены примеры реализации задач диагностики с учетом выдвигаемых гипотез, используемых моделей и алгоритмов, механизмов поведения пользователей на сетях.

**Ключевые слова:** нелинейная сетевая оптимизация, топология транспортных сетей, допустимое множество вариантов, сетевые естественно-монопольные технологии, диагностика сетевых естественно-монопольных свойств, оценка субаддитивности, нормативная и поведенческая идентификация, технологические детерминанты, информационные и модельные взаимосвязи.

**DOI:** 10.14357/20790279250401 **EDN:** GMBUBX

### Введение

Статья базируется на значимом фундаменте, сочетающем подходы различных теоретико-прикладных направлений исследований – оптимизации нелинейных сетевых транспортных задач с учетом оценки технологических детерминант,

исследуемых в рамках современной теории естественной монополии [1-8].

Непосредственно связанные с указанными направлениями разработки по созданию в ФИЦ ИУ РАН и ЦЭМИ РАН информационной технологии синтеза сложных сетевых структур [9-12] ориенти-

рованы на исследование задач по взаимосвязи моделей и методов нелинейной сетевой транспортной оптимизации, теории естественной монополии и инвестиционного проектирования. В рамках этих работ применительно к региональной транспортной сети была проведена серия пилотных вариантовых расчетов. Апробация проводилась с выделением ряда направлений исследований рассматриваемой проблематики, включая оценку эффекта целостности при различных способах формирования спроса на перевозки и динамики взаимосвязей технологических детерминант, характеристик сетевого инвестиционного проекта, учет влияния различной степени нелинейности сетевых затрат, внешних эффектов на естественно-монопольные свойства транспортной сети [3,4,8,12-16].

Цель данной статьи – обобщение имеющихся разработок и построение информационной модели системы оценки сетевых естественно-монопольных технологий, предназначенный для формирования множества вариантов, целесообразных с позиций технологии и организаций, и анализа существенных факторов, снижающих эффективность сетевой транспортной инфраструктуры.

## 1. Содержательная постановка задачи и используемые методы

Вопросам построения оптимальных планов развития сетевой транспортной инфраструктуры, в том числе при условиях нелинейной сетевой оптимизации [17-19], посвящено множество публикаций. Вместе с тем, применительно к этому направлению исследований не ставилась задача формирования множества вариантов, целесообразных с позиций естественно-монопольной технологии и возможностей отраслевой организации, из которых и выбирается наилучшее. Поиск этого множества нельзя полностью формализовать. В определенной мере стоит попробовать применять эвристический подход и экспертные процедуры. Прежде всего, требуется обоснованное понимание того, в какой области производить поиск, по каким критериям и с учетом каких налагаемых ограничений.

Существенной проблемой при этом является включение в условия соответствующих оптимизационных задач всех рациональных вариантов сетевого развития. При построении исходных условий оптимизационных задач, помимо ошибок в количественной оценке неопределенных параметров, потенциально лучшие варианты развития и функционирования сети могут быть исключены из рассмотрения из-за плохо изученных возможностей расширения сетевой конфигурации. Неизвестны

как стоимость, так и техническая выполнимость строительства новых маршрутов, условия проложения которых не были исследованы. Чтобы включить то или иное звено в план сетевого развития, необходимо провести хотя бы минимальные предпроектные изыскания, которые требуют организационных и финансовых ресурсов, а также затрат времени. Определить лучшие направления такого поиска предлагается на основе анализа технологических детерминант [3, 20-25], которые могут рассматриваться в качестве эвристических оценок формирования пространства поиска.

Предполагается исследование факторов, определяющих возможности нормальной работы и развития транспортной сети. В рассмотрение необходимо включать результаты серии оптимизационных расчетов функционирования и развития транспортной сети, с использованием методов и процедур выбора маршрутов по предельным и средним издержкам, последовательной фиксацией одних факторов и, напротив, варьированием других, для получения приемлемых результатов по заданному критерию и ограничениям.

При уточнении границ области допустимых решений по моделям нелинейной сетевой транспортной оптимизации и использовании оценок технологических детерминант, в свою очередь, следует учитывать, что сами технологические детерминанты, согласно положениям теории естественной монополии, должны строиться исходя из условий оптимизации технологии (или приближения к ним), применительно к инфраструктурным подсистемам – сетевой, с оптимальным распределением затрат по звеньям сети.

Возможности такого рода уточнений и корректировок определяются мощностью модельного и аналитического инструментария современной теории естественной монополии, ориентированного на анализ по заданному затратному критерию эффективных схем отраслевой организации различных вариантов специализации и объединения сетевых инфраструктурных подсистем, учет возможностей организации деятельности и специфики сетевой естественно-монопольной технологии. При этом теоретико-прикладные модели теории естественной монополии исследуют ситуации функционирования и развития сети при различных уровнях спроса, включая случаи перегруженности сети.

В предлагаемой системе информационных и модельных взаимосвязей информация об оценках технологических детерминант, построенных на оптимальных сетевых естественно-монопольных технологиях, формируется в итеративном режиме, с включением результатов решения задачи

нелинейной сетевой оптимизации и, напротив, в свою очередь, на основе оценки технологических детерминант появляется возможность для корректировки допустимого множества вариантов развития транспортной сети, целесообразных с позиций технологии и организации (рис. 1).

## 2. Оптимизация сетевой транспортной инфраструктуры в контексте анализа естественно-монопольных свойств и формирование выборки данных

Включение в стратегический анализ оптимального развития транспортных сетей естественно-монопольного компонента – в качестве гипотезы – предполагает, что в случае недоиспользования технологических возможностей организации деятельности транспортной сети как естественной монополии, будет иметь место недостаточно эффективное функционирование сети, и одной из возможных причин этого являются ошибки в определении возможностей ее развития. Кроме того, существен-

ная нелинейность издержек в условиях перегруженности сети негативно влияет на точность прогнозирования потоков на звеньях сети, поскольку трудно предсказуемые небольшие изменения в уровне транспортного спроса и других характеристик могут приводить к существенному росту издержек.

В современной теории естественной монополии и соответствующих разработках теоретико-прикладных подходов к моделированию естественно-монопольных характеристик пространственных сетей при решении задач государственного управления развитием транспортной инфраструктуры формируется система обоснований по проведению технологической (нормативной) и поведенческой идентификации естественной монополии.

Используются оценки специальных технологических детерминант, прежде всего, индикаторов экономии от структуры ( $SC$ ), и средних приростных издержек ( $AIC$ ), лишь в определенной мере – индикатора экономии от масштаба ( $S$ ).

Индикатор  $SC$  дает сравнительную оценку по издержкам гипотетических вариантов способов ор-



**Рис. 1. Информационные и модельные взаимосвязи при оценке сетевых естественно-монопольных технологий**

ганизации производства инфраструктурных услуг через построение ортогональных расщеплений, а не произвольного их набора. В множество рассматриваемых конструируемых и вычислимых вариантов включаются как варианты совместного производства всех видов продукции/услуг, так и варианты, полностью специализированные по одному или нескольким видам деятельности (при условии обеспечения суммарного одинакового объема спроса). Использование этого индикатора позволяет уйти от необходимости перебора всего множества вариантов организации производства и ограничиться обозримым множеством ортогональных расщеплений.

Оценка **AIC** связана с началом/прекращением выпуска какого-то одного вида продукции/услуг. В расчеты эффективности включается прирост издержек и (или) их экономия на единицу объема выпуска этого вида продукции.

При нормативной идентификации оцениваются значения естественно-монопольных характеристик для варьируемых объемов спроса и проверяются необходимые и достаточные условия существования естественной монополии при оценке субаддитивности многопродуктовой общесетевой функции совокупных издержек и принятием в расчет концепции сетевой субаддитивности [1,26].

Оценка субаддитивности определяется при сравнении разницы совокупных издержек между их величиной для полного объема инфраструктурных услуг (в ситуации целостной естественно-монопольной организации) и суммой аналогичных издержек при потенциальному/типотетическом расщеплении, отвечающем удовлетворению выявленного суммарного объема спроса.

Необходимым условием субаддитивности является наличие экономии от структуры (**SC>0**); для однопродуктового выпуска это условие является также и достаточным.

Достаточные условия субаддитивности определяются соблюдением совокупности двух следующих требований: снижение во всей допустимой области выпуска средних приростных издержек **AIC** по всем наборам продуктов/ услуг; наличие экономии от структуры (**SC>0**).

Экономия от масштаба **S** – как обратная величина к затратной эластичности по выпуску для однопродуктового случая или к сумме затратных эластичностей по каждому продукту для много-продуктового случая – интуитивно понятный индикатор и может оказаться полезным при анализе динамики эффективности/неэффективности деятельности в рамках проектируемой организационной структуры, но этот индикатор неинформативен с позиций оценки субаддитивности.

При эконометрическом моделировании функции издержек (квази-функции, в том числе, гедонической) подбираются типы пригодных для установления субаддитивности функциональных форм: квадратичной или композитной [27,28]. При предпочтительности композитной формы для анализа субаддитивности и та и другая функциональные формы обеспечивают априорную непредсказуемость значений технологических детерминант при исследовании естественно-монопольных свойств транспортных сетей.

При обобщениях трактовок результатов экспериментальных расчетов может быть полезен учет различных способов кластеризации постановок задач диагностики в сочетании с наборами влияющих факторов и различными их классификациями. Так, эконометрически на основе серии оптимизационных расчетов по заданным точкам выборки в пространстве результатов вычислительных экспериментов моделируется общесетевая функция совокупных издержек для соответствующих объемов одно- или многопродуктового выпуска.

Выборка данных, используемая для анализа субаддитивности издержек естественных монополий, формируется серией расчетов по оптимизационной сетевой модели при различных уровнях общего сетевого спроса на перевозки, изменяемого в заданном диапазоне. В результате для каждого уровня этого агрегированного спроса вычисляются годовые общественные издержки  $F^*$ , включая инфраструктурную и транспортную составляющую<sup>1</sup>, при наилучшем варианте развития и функционирования транспортной сети:

$$\begin{aligned} F^* = \min_{Y,N} & (\sum_{u,h} f_{uh}(Y, N) N_{uh} + \\ & + \sum_u (Ekf_u^K(y_u) + f_u^\partial(y_u, N_u))); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{u,h} (b_u^\partial - b_{uh})/kE + \sum_u b_u^K(y_u)) \leq B; \quad (2)$$

$$\sum_u I_{lu} N_{lsuh} + Q_{lsh} = 0, l: I_{lu} < 0, l \neq s; \forall h; \quad (3)$$

$$\sum_u I_{su} N_{lsuh} - Q_{lsh} = 0, s: I_{su} > 0, l \neq s, \forall h; \quad (4)$$

$$\sum_u I_{ru} N_{lsuh} = 0, r \neq s, r \neq l, l \neq s, \forall h; \quad (5)$$

$$Q_{lsh} = k_{lsh} Q_h, \forall l, s, h; \quad (6)$$

$$\sum_u N_{lsuh} f_{uh} \leq Q_{lsh} f_{lsh}^H, l \in L^H, s \in S^H, \forall h, \quad (7)$$

где  $Y$  – вектор искомых технических состояний звеньев сети;

<sup>1</sup> С учетом специфики структуры затрат сетевых технологий железнодорожного и автомобильного транспорта, преимущественно включаемых в рассмотрение.

$N$ -матрица искомых значений интенсивности движения транспортных средств различного типа ( $h=1,\dots,H$ ) на звеньях сети ( $u=1,\dots,U$ );

$f_{uh}$ ,  $f_u^K$ ,  $f_u^\vartheta$  – функции затрат в общественных ценах, соответственно, удельных транспортных на перемещение потока  $N_u$  по звену  $u$ , инвестиционных, необходимых для технического состояния  $y_u$  звена  $u$ , и нормативных эксплуатационных затрат, соответствующие состоянию  $y_u$  звена  $u$ ;  $k$  – экзогенный коэффициент дисконтирования стоимости строительства к моменту его завершения;

$E$  – общественная норма дисконта [29] и звена  $u$ , соответственно;

$Ef_u^K$  – годовая стоимость капитала, вложенного в развитие звена  $u$ ;

$B$  – заданное ограничение на бюджет инвестиций;

$b_{uh}$  – текущие денежные поступления рассматриваемой сетевой структуры от обслуживания транспортных потоков (например, бюджетные отчисления в специальные фонды, взимаемая плата за проезд);

$b_u^\vartheta$  – эксплуатационные расходы; выражением  $(b_u^\vartheta - b_{uh})/kE$  приблизительно оцениваются изменения бюджета инвестиций;

$b_u^K$  – инвестиционные бюджетные расходы;

$I_{lu}$  – матрица инцидентности;

$l$  – индекс пункта (вершины графа),  $I_{lu} = 1$ , если дуга  $u$  входит в вершину  $l$  и  $I_{lu} = -1$ , если дуга  $u$  выходит из вершины  $l$ ;

$N_{lsuh}$  – транспортный поток (интенсивность движения) вида  $h$  из начального пункта  $l$  в конечный пункт  $s$  по звену  $u$ ;

$Q_{lsuh}$  – объем корреспонденций вида  $h$  из начального пункта  $l$  в конечный  $s$ ;  $Q_h$  – суммарный объем корреспонденций вида  $h$ ;

$k_{lsuh}$  – коэффициенты, определяющие объемы корреспонденций (могут быть заданы экзогенно или определяться эндогенно на основе дополнительных моделей транспортного спроса);

$f_{lsuh}^H$  – экспертно заданная верхняя граница удельных затрат для некоторых поездок, определяющая приемлемый уровень транспортной доступности.

Исследуемая допустимая область значений спроса на услуги транспортной сети ограничена сверху в соответствии с прогнозируемым ростом агрегированных (на уровне сети в целом) объемов перевозок за рассматриваемый период.

### 3. Анализ ключевых факторов, влияющих на естественно-монопольные свойства и направления корректировки исходных данных

Исходные данные могут корректироваться в зависимости от того, влияние каких факторов

и/или управленческих решений на естественно-монопольные свойства, предполагается исследовать.

На основе исследования факторов, существенно влияющих на естественно-монопольные свойства сети, формируются рекомендации по управлению функционированием и развитием сети, направленные на повышение эффективности ее работы. Соответствующий анализ почти аналогичен процедурам учета неопределенности (сценарному анализу) при оценке инвестиционных проектов, но вместо или дополнительно к традиционным показателям эффективности вычисляются значения технологических детерминант и проверяются условия соблюдения естественно-монопольных свойств, на основе чего определяются критические границы значений факторов, нарушение которых приводит к качественному ухудшению функционирования сетевой структуры.

При исследовании информационных и модельных аспектов формирования вариантов развития сетевой транспортной инфраструктуры следует использовать результаты анализа факторов, связанных с оценкой естественно-монопольных свойств, учет которых оказывает существенное влияние на качество управленческих решений по развитию сети.

На основе обобщения опыта моделирования и экспериментальных расчетов [3,4,8,11-16] могут быть выделены следующие факторы, выявление зависимости от которых имеет первоочередной характер влияния на оценки естественно-монопольных свойств:

- использование агрегированного, по сети в целом, экзогенного спроса или детализированного по элементам сети эндогенного спроса;
- использование предельных или средних издержек при определении кратчайших маршрутов;
- использование различных способов учета инвестиционных ограничений и включение в оценки инвестиционных ограничений различной степени жесткости.

Эндогенное представление матрицы детализированных объемов спроса определяет возможности усиления адекватности оценок на основе не фиксированной, а переменной шахматной таблицы корреспонденций, с учетом складывающихся предпочтений конечных пунктов перевозок и изменений в структуре сети. Следует отметить, что выбор той или иной транспортной модели не гарантирует более высокой точности транспортных прогнозов, поэтому целесообразно варьировать способы детализации транспортного спроса.

Исследование фактора использования в оценках предельных или средних издержек отвечает условиям поиска кратчайших маршрутов

на основе системного и пользовательского равновесия. 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. Как доказано в теории [18, 30], причем не только при моделировании для случая линейных, но и нелинейных издержек сетевых транспортных технологий [17, 19, 31], системное равновесие обеспечивается, когда все требуемые перевозки направляются по кратчайшим, в смысле дифференциальных (предельных) затрат, маршрутам от пункта отправления к пункту прибытия.

Ограниченностю инвестиционных средств в транспортную инфраструктуру безусловно является одним из существенных факторов оценки. Необходимый уровень инвестиций для развития сети определяется не только исчерпанием потенциала пропускной способности, но качеством текущего и стратегического управления. Вариантные расчеты позволяют определить (для каждого уровня общесетевого агрегированного спроса) нижние границы бюджета инвестиций или верхние границы оценки дефицитности инвестиций (в зависимости от конкретной постановки решаемых оптимизационных задач), нарушение которых приводит к качественному ухудшению работы сети. И в том, и другом случае определяется зависимость технологических детерминант от усиления дефицитности ограничений на объем инвестиций в развитие сети и выявляются диапазоны неэффективной нагрузки на сеть с учетом динамики спроса и ее неопределенности.

Следует подчеркнуть, что в постановках задач без ограничений на бюджет инвестиций должен соблюдаться принцип дефицитности используемых ограниченных ресурсов. Инвестиции, требуемые для реализации оптимальной программы (т.е. связанного набора инвестиционных мероприятий или проектов), могут быть использованы и иным образом (в другой сфере экономики, отрасли, для развития другой сети или ее полигона) [32, с. 75]. Ограниченностю общего, для экономики в целом, объема инвестиций отражается в расчетах в виде социальной (общественной, народнохозяйственной) ставки (нормы) дисконта, которая характеризует минимальные требования общества к эффективности инвестиций [33, с. 24]. Вместе с тем, имеют место и менее глобальные инвестиционные ограничения, связанные с делением экономики на регионы, отрасли и формированием отдельных программ, подпрограмм,

причем перераспределение средств из одного сектора в другой не бесплатно (так, увеличение налоговых сборов может приводить к ухудшению экономической ситуации в целом) или законодательно запрещен как нецелевое использование бюджетных средств. Учет таких ограничений возможен двумя способами в зависимости от расположаемой информации – в явном виде, когда использование инвестиций не превышает или почти не превышает) бюджет инвестиций (см. условие (2)), и не явно, когда используемые инвестиции включаются в системный критерий с повышающим коэффициентом.

Включение каждого из этих факторов определяет корректировку используемых алгоритмов по оптимизации развития сети и отдельных ее звеньев.

Как отмечалось выше, оптимизационные задачи вида (1) – (7) решаются для каждого уровня (точки) в заданной области спроса. В результате серии расчетов определяются возможные границы изменения интенсивности движения для отдельных звеньев, на основе чего проводится исследование экономии от структуры  $SC$  для отдельных звеньев транспортной сети с целью определения наиболее целесообразных вариантов расширения конфигурации сети, точнее – вариантов необходимых изысканий, на основе которых удастся установить целесообразность такого расширения.

Возможный выигрыш от дублирования отдельных звеньев оценивается условием:

$$R_u^* = \max_p (F_u^*(N_u) - F_u^*(p_1 N_u) - F_u^*((1 - p_1) N_u)) \quad (8)$$

где  $p_1$  – вектор, определяющий «расщепление» потока  $N_u$ ,  $1 \geq p_{1h} \geq 0, \forall h$ .

Если некоторая часть потоков (обозначим как  $p_1^\phi$ ) не может быть перераспределена на гипотетические дублирующие звенья, условие (8) дополняется ограничением:

$$p_1 \geq p_1^\phi. \quad (9)$$

На основе анализа значений  $R_u^*$  определяются цепочки звеньев с существенными нарушениями субаддитивности издержек и предлагаются варианты их дублирования для дальнейшего изучения и проведения изысканий.

Последовательность построения новой конфигурации сети с включением оценок естественно-монопольных свойств фрагментов сети и в рамках предлагаемой системы взаимосвязей, ориентированной на компьютерную реализацию:

1. Задается исходная конфигурация, к существующим звеньям добавляются новые на основе

- оценок экспертного характера и данных проведенных ранее изысканий;
2. Решается оптимизационная задача развития сети;
  3. Звенья и цепочки звеньев проверяются на суббадитивность;
  4. На основе полученных оценок  $R_u^*$  предлагаются возможные варианты дублирования сети для дальнейших изысканий.

#### **4. Анализ примеров реализации задач диагностики естественно-монопольных свойств**

Для выявления роли факторов в нарушении естественно-монопольных свойств сети в целом и ее фрагментов (полигонов) была проведена серия оптимизационных расчетов функционирования и развития транспортной сети, с последовательной фиксацией одних факторов и, напротив, варьированием других. Информационная основа для оценки – специально формируемые в процессе модельных расчетов данные о минимальных или приближенных к ним значениях совокупных издержек на перевозки и развитие сети. Для их генерации формируется множество точек агрегированного транспортного спроса (по сети в целом на перспективный период), для каждой из которых решается задача оптимизации структуры сети с учетом распределения потоков по звеньям.

При исследовании влияния инвестиционных ограничений на естественно-монопольные свойства проверяется гипотеза, что транспортная сеть сохраняет естественно-монопольные свойства при условиях, что отсутствуют технологические ограничения на расширение сети и дефицитность инвестиций носит умеренный характер (что примерно соответствует норме дисконта не выше 20%). Варианты расчетов включают различные сценарии работы и развития сети, для которых строятся модели их развития как без ограничений на объемы инвестиций, так и при существенном их сжатии [3]. Таким образом, в системе взаимосвязей подходов к оптимизации развития сети и оценке технологических детерминант на оптимальных технологиях, общесетевая функция (квази-функция) совокупных издержек моделируется для сценариев, различающихся как жесткостью ограничений на суммарный объем инвестиций, так и значениями принимаемых в расчет ставок дисконта. При этом значения ставок дисконта допускают их интерпретацию как цен на соответствующий ресурс: при больших ставках дисконта – относительно более «дорогих» инвестиционных ресурсов, а при меньших – относительно более «дешевых».

Результаты экспериментальной компьютерной реализации на примере региональной дорожной транспортной сети [3] с применением информационной технологии синтеза сложных сетевых структур [11] подтвердили, что оценки технологических детерминант, как характеристик естественно-монопольной технологии, определяются жесткостью инвестиционных ограничений. По мере усиления жесткости область суббадитивности сжимается, т.е. транспортная сеть продолжает функционировать в эффективном режиме с сохранением синергического эффекта, но при меньших объемах спроса на перевозки.

При исследовании фактора использования в оценках предельных или средних издержек [14] предполагается, что для каждой корреспонденции затраты на поездки одинаковы для всех используемых маршрутов и меньше, чем затраты неиспользуемых маршрутов. Вместе с тем, практически трудно осуществить эффективное управление поведением пользователей так, чтобы сблизить расходжение системного (общественного) и пользовательского равновесий [34]. Тем не менее, принимается допущение, что такая 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 успешно реализована.

При проведении экспериментальных расчетов проверялась гипотеза о близости значений технологических детерминант, полученных на основе распределения транспортных потоков в соответствии с поведенческими правилами пользователей и в соответствии с условием системного равновесия. В определенной мере правдоподобность выдвижения такой гипотезы может быть подтверждена результатами, полученными в работах [35, 36] на примерах городских сетей, где было показано, что снижение затрат времени при распределении по предельным издержкам составляет 1-5% в сравнении с пользовательским равновесием.

Результаты экспериментальных расчетов по региональной сети автодорог по пользовательскому и системному критерию [14] подтвердили выдвинутую гипотезу: различия в оценках значений технологических детерминант – во втором и третьем знаках после запятой. Принятая гипотеза обеспечивает и правомерность сопоставительного анализа оценок естественно-монопольных индикаторов деятельности при различных вариантах расчетов и алгоритмах выбора маршрутов [37]. Соответственно, требования с позиций теории к оценке естественно-монопольных свойств на основе оптимальной технологии не будут противоречить механизмам реального поведения пользователей дорог.

Выбор транспортных моделей с фиксированными объемами корреспонденций или зарождения и поглощениями поездок может приводить к отрицательному эффекту масштаба, поэтому необходимо рассматривать разные варианты территориального развития, которые позволяли бы перераспределить транспортные потоки с перегруженных корреспонденций, характеризующихся существенной дезэкономией на масштабе.

## Заключение

Предлагаемые подходы к оптимизации сетевой транспортной инфраструктуры и формированию выборки данных для анализа естественно-монопольных свойств направлены на корректировку обозримого допустимого множества вариантов развития региональной транспортной инфраструктуры в контексте анализа ключевых факторов, влияющих на качество управленческих решений в рассматриваемой сфере.

Разработанные схемы информационных и модельных взаимосвязей могут быть полезны при составлении перспективных схем развития транспортных сетей – диагностике «узких мест» и сокращении их количества, экономической целесообразности дублирования конкретных фрагментов сети, расширения ее исходной топологии.

## Литература

- 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.
- Белоусова Н.И., Васильева Е.М. Моделирование параметров отраслевых технологий и учет естественно-монопольной специфики // Восьмая Международная конференция «Системный анализ и информационные технологии» САИТ – 2019 (8 – 14 июля 2019 г., Иркутск – Листвянка): Труды конференции. М.: ФИЦ ИУ РАН. 2019. С. 422-429.
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. Оценка параметров инфраструктурных технологий в условиях реформы госрегулирования российских естественных монополий // Экономический анализ: теория и практика. 2020. Т. 19. Вып. 4. С. 663–682. <https://doi.org/0000-0001-5075-6787/>
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Васильев В.Б. Диагностика транспортных сетей как естественных монополий во взаимосвязи с характеристиками сетевого проекта // Труды ИСА РАН. 2020. Т. 70. Вып.4. С.3-15. DOI: 10.14357/20790279200401.
- 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. Т. 71. Вып.1. С.10–21. DOI: 10.14357/20790279210102.
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Лившиц В.Н., Миронова И.А. О расширении спектра моделей системной оценки эффективности проектов развития сетевой транспортной инфраструктуры // Труды ИСА РАН. 2022. Т. 72. Вып. 2. С. 3–18. DOI: 10.14357/20790279220201.
- Лившиц В.Н., Белоусова Н.И., Васильева Е.М. Мезоэкономика развития транспортных сетей как естественных монополий: в коллект. мон. “Мезоэкономика: стратегия разбега”. Разд. 15.1. Ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнер. М.: ИД Научная библиотека, 808 с. 2022. С. 582–610.
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Лившиц В.Н., Миронова И.А. Моделирование оценки системной эффективности развития сетевой транспортной инфраструктуры // Труды ИСА РАН. 2023. Т.73. Вып.3. С. 9-80. DOI: 10.14357/20790279230308.
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Лившиц В.Н., Позамантир Э.И. Совершенствование теоретических основ, моделей и методов оптимизации развития сети автомобильных дорог // Аудит и финансовый анализ. 2004. Вып.3. С.114-204.
- Лившиц В.Н., Позамантир Э.И., Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. Информационная технология синтеза сложных сетевых структур нестационарной российской экономики: модели, алгоритмы, программная реализация // Аудит и финансовый анализ. 2008. Вып.1. С.50-88.
- 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 развитии // Аудит и финансовый анализ. 2011. Вып.4. С.138-159.
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Васильев В.Б. Естественно-монопольные свойства транспортных сетей: многопродуктовые модели диагностики // Аудит и финансовый анализ. 2018. Вып. 2. С.129–147.
- Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. Моделирование диагностики естествен-

- но-монопольных свойств транспортных сетей / Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сб. научных трудов XVI Межд. школы-симпозиума АМУР-2022 (Симферополь-Судак, 14-27 сентября 2022). Симферополь: ИП Корниенко А.А. 2022. С. 56-63.
14. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. Сопоставительный анализ варьируемых оценок естественно-монопольной идентификации региональной транспортной сети / Анализ, моделирование, управление, развитие социально-экономических систем: сб. научных трудов XVII Межд. школы-симпозиума АМУР-2023 (Симферополь-Судак, 14-27 сентября 2023). Симферополь: ИП Корниенко А.А. 2023. С. 63-68.
15. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М. О направлениях вариативного анализа нормативной идентификации естественно-монопольных свойств региональной транспортной сети / Материалы XXIV Всероссийского симпозиума «Стратегическое планирование и развитие предприятий» (М., ЦЭМИ РАН, 11-12 апреля 2023). Секция 2. М.: ЦЭМИ РАН. 2023. С. 304-309.
16. Белоусова Н.И., Бушанский С.П., Васильева Е.М., Миронова И.А. О моделировании оценок естественно-монопольной синергии // Аудит и финансовый анализ. 2023. №5. С.4-10.
17. Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные сетевые транспортные задачи. М.: Транспорт. 1972. 144с.
18. Стенбринк П. Оптимизация транспортных сетей. Пер. с англ. М.: Транспорт. 1981 (Peter A. Stenbrink. Optimization of Transport Networks. L., N.Y., Sydney, Toronto, Ed. John Wiley&Sons. 1974).
19. Васильева Е.М., Левит Б.Ю., Лившиц В.Н. Нелинейные транспортные задачи на сетях. М.: Финансы и статистика. 1981. 104 с.
20. Baumol W.J., Panzar J.C., Willig R.D. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ. 1982. 497 p.
21. Baumol W.J., Willig R.D. Contestability: development since the book // Oxford Economic Papers, New Series. Suppl.: Strategic Behavior and Industrial Competition. 1986;38 (Nov.):9-36.
22. Sharkey W. The Theory of Natural Monopoly. Cambridge: Cambr. Univ. Press. 1982. 229 p.
23. Белоусова Н.И., Васильева Е.М. Вопросы теории государственного регулирования и идентификации естественных монополий. М.: Ком-Книга. 2006. 320 с.
24. 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.
25. Белоусова Н.И., Васильева Е.М. Естественно-монопольные индикаторы деятельности: теоретические и прикладные аспекты анализа // Труды ИСА РАН. 2018. Вып.3. С.69-82. DOI: 10.14357/20790279180307.
26. Васильева Е.М. Формирование оценок эффективности естественно-монопольных производственных систем. М.: Книжный дом «Либроком». 2008. 176с.
27. Roller L.H. Proper quadratic cost functions with an application to the Bell System // The Review of Economics and Statistics. 1990;72:202-210.
28. 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.
29. 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.
30. Kantorovich L.V. Mathematical methods in the organization and planning of production. Publication house of the Leningrad University; Transl. in Management Science. 1960. P. 366-422.
31. Bushansky S.P., Vasilieva E.M., Livchits V.N. Optimization Transport Computations / 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.
32. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов (утверждено Минэкономики РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ 21.06.1999). 1999. 271с.
33. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Третья редакция, исправленная и дополненная. 2008. 248 с.
34. Бушанский С.П. Неэффективность дорожных концессий в России: исключение или правило? // Журнал Новой экономической ассоциации. 2021. №2(50). С. 97-118. DOI: 10.31737/2221-2264-2021-50-2-5.
35. Mamin M.S., Siddique A., Rahman S.M.R. Comparison of user equilibrium (UE) and system optimum (SO) traffic assignment methods for

- auto trips / International conference on recent innovation in civil engineering for sustainable development (IICSD-2015). 2015. P. 736-740.
36. Boyce D., Xiong Q. User-optimal and system-optimal route choices for a large road network // Review of Network Economics. 2004;3(4):371-380.
37. Белоусова Н.И., Бушанский С.П. О направлениях реализации задач диагностики естественно-монопольных свойств и механизмах экономического поведения на сетях / Тенденции развития Интернет и цифровой экономики: сб. научных трудов VIII Межд. научно-практической конференции (Симферополь-Алушта, 29-31 мая 2025). Симферополь: ИП Зуева. 2025. С. 6-10.

**Белоусова Наталия Ивановна.** Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук», г. Москва, Россия. Ведущий научный сотрудник. Доктор экономических наук. Область научных интересов: естественные монополии, методология системной оценки. E-mail: natabel.52@mail.ru; NBelousova@frccsc.ru (Ответственная за переписку)

**Бушанский Сергей Петрович.** Центральный экономико-математический институт Российской академии наук, г. Москва, Россия. 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: dbd-s@yandex.ru

## On the elaboration of an information and model database for network natural monopoly technologies

N.I.Belousova<sup>I</sup>, S.P.Bushansky<sup>II</sup>

<sup>I</sup> Federal Research Center “Computer Science and Control” of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>II</sup> Central Economics and Mathematics Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** The article explores the formation of a feasible set of options for the development of network transport infrastructure from the perspective of technology and organization, using the tools of natural monopoly theory. The proposed schemes of information and model relationships allow for the adjustment of the topology of transport networks in response to variations in demand taking in account natural monopoly qualities. Based on the generalization of modeling experience and experimental calculations, an analysis was performed to identify the factors that have a primary impact on the quality of management decisions regarding network configuration changes, including diagnostics of natural monopoly properties. The article provides examples of implementing diagnostic tasks based on hypotheses, models, algorithms, and user behavior mechanisms on networks.

**Keywords:** nonlinear network optimization, topology of transport network, acceptable set of options, network natural monopoly technologies, diagnostics of network natural monopoly properties, assessment of subadditivity, normative and behavioral identification, technology determinants, technology and organization, information and model relationships.

**DOI:** 10.14357/20790279250401 **EDN:** GMBUBX

### References

1. Belousova N.I., and Vasil'eva E.M. Diagnostics of network infrastructure technologies properties under reforming the system of Russian natural monopolies state regulation. Rossijskij ekonomicheskij zhurnal. 2019;3:25-35. doi: 10.33983/0130-9757-2019-3-25-35 (In Russ.).
2. Belousova N.I., and Vasil'eva E.M. Modeling of industry-specific technology parameters and consideration of natural monopoly specifics. 8th Conference (International) “System analysis and informational technology” Proceedings. Moscow. 2019. P. 422-429 (In Russ.).
3. Belousova N.I., Bushanskij S.P., and Vasil'eva E.M. Assessment of the parameters of infrastructure technologies in the context of state regulation reform of Russian natural monopolies. Ekonomicheskij analiz: teorija I praktika. 2020;19(4):663-682. <https://doi.org/0000-0001-5075-6787> (In Russ.).

4. *Belousova N.I., Bushanski, S.P., Vasil'eva E.M., and Vasil'ev V.B.* Diagnostics of transport networks as natural monopolies in relation to the characteristics of a network project. *Trudy ISA RAN.* 2020;71(4):3-15. DOI: 10.14357/20790279200401 (In Russ.).
5. *Belousova N.I., Vasil'eva E.M., Livshitz V.N., and Mironova I.A.* Conceptual foundations for modeling the assessment of the system efficiency of network transport infrastructure development. *Trudy ISA RAN.* 2021;71(1):10-21. DOI: 10.14357/20790279210102 (In Russ.).
6. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., Livshitz V.N., and Mironova I.A.* On expanding the range of models for system-based evaluation of the effectiveness of network transport infrastructure development projects. *Trudy ISA RAN.* 2022;72(2):3-18. DOI: 10.14357/20790279220201 (In Russ.).
7. *Livshitz V.N., Belousova N.I., and Vasil'eva E.M.* Mesoeconomics of the development of transport networks as natural monopolies. Part 15.1 in collective monography "Mesoeconomics of Russia: divergence strategy", ed. G.V. Kleiner. Moscow: Publishing House Scientific Library. 2022. P. 582–610 (In Russ.).
8. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., Livshitz V.N., and Mironova I.A.* Modeling the assessment of the system efficiency of network transport infrastructure development. *Trudy ISA RAN.* 2023;73(3):9-80. DOI: 10.14357/20790279230308 (In Russ.).
9. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., Livshitz V.N., and Pozamantir E.I.* Improvement of theoretical foundations, models, and methods for optimizing the development of the road network. *Audit i finansovyyj analiz.* 2004;3:114-204 (In Russ.).
10. *Livshitz V.N., Pozamantir E.I., Belousova N.I., Bushanskij S.P., and Vasil'eva E.M.* Information technology for synthesizing complex network structures in the non-stationary Russian economy: models, algorithms, and software implementation. *Audit i finansovyyj analiz.* 2008;1:50-88 (In Russ.).
11. *Livshitz V.N., Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., and Guk S.N.* Analysis of the dynamics of technological determinants of natural monopoly transport networks under optimal development. *Audit i finansovyyj analiz.* 2011;4:138-159 (In Russ.).
12. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., and Vasil'ev V.B.* Natural monopoly properties of transport networks: multiproduct models of diag-nostics. *Audit i finansovyyj analiz.* 2018;2:129–147 (In Russ.).
13. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., and Vasil'eva E.M.* Modeling the diagnostics of natural monopoly properties of transport networks. XVIth School-Simpozium (International) "Analysis, modeling, management, development of social-economic systems" Proceedings. Simferopol-Sudak. 2022. P. 56-63 (In Russ.).
14. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., and Vasil'eva E.M.* Comparative analysis of varying estimates of natural monopoly identification of the regional transport network. XVIIth School-Simpozium (International) "Analysis, modeling, management, development of social-economic systems" Proceedings. Simferopol-Sudak. 2023. P. 63-68 (In Russ.).
15. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., and Vasil'eva E.M.* On the directions of variational analysis of the regulatory identification of natural monopoly properties of the regional transport network. XX-IVth Symposium (All-Russian) "Strategy planning and enterprise development" Proceedings. Moscow. 2023. P. 304-309 (In Russ.).
16. *Belousova N.I., Bushanskij S.P., Vasil'eva E.M., and Mironova I.A.* On modeling assessments of natural monopoly synergy. *Audit i finansovyyj analiz.* 2023;5:4-10. (In Russ.)
17. *Levit B.U., and Livshitz V.N.* Non-linear network transport models]. Moscow: Transport. 1972. 144 p. (In Russ.).
18. *Stenbrink P.A.* Optimization of Transport Networks. L., N.Y., Sydney, Toronto. 1974. 325 p.
19. *Vasil'eva E.M., Levit B.U., and Livshitz V.N.* 1981. Non-linear transport models on networks. Moscow: Financi i statistika. 1981. 104 p. (In Russ.).
20. *Baumol W.J., Panzar J.C., and Will R.D.* (In Russ.).ig. Contestable Markets and the Theory of Industry Structure. N.Y.: HBJ. 497 p.
21. *Baumol W.J., and Willig R.D.* 1986. Contestability: development since the book. Oxford Economic Papers, New Series. Suppl.: Strategic Behavior and Industrial Competition. 1986;38 (Nov.):9-36.
22. *Sharkey W.* The Theory of Natural Monopoly. Cambridge: Cambr. Univ. Press. 1982. 229 p.
23. *Belousova N.I., and Vasil'eva E.M.* Issues of the theory of state regulation and identification of natural monopolies. Moscow: KomKniga. 2006. 320 p. (In Russ.).
24. *Belousova N.I., Vasil'eva E.M., and Livshitz V.N.* Models of identification of natural monopolies and their state regulation (opportunities for expanding the classical theory). *Ekonomika i matematicheskie metody.* 2012;48(3):64–78 (In Russ.).

25. *Belousova N.I., and Vasil'eva E.M.* Natural monopoly activity indicators: theoretic and applied aspects of analysis. Trudy ISA RAN. 2018;68(3):69-82. doi: 10.14357/20790279180307 (In Russ.).
26. *Vasil'eva E.M.* Formation of Efficiency Assessment of Natural-Monopoly Production Systems. Moscow: Knijnij dom "Librokom". 2008. 176 p. (In Russ.).
27. *Rolle, L.H.* Proper quadratic cost functions with an applications to the Bell System. The Review of Economics and Statistics. 1990;72(2):202-210.
28. *Pulley L.B., and Braunstein Y.M.* A composite cost function for multiproduct firms with an application to economies of scope in banking. The Review of Economics and Statistics. 1992;74(2):221-230.
29. *Vilenskij P.L., Livshitz V.N., and Smoljak S.A.* Evaluation of the Effectiveness of Investment Projects: Theory and Practice. 5th ed., revised and exp. Moscow: Poly Print Service. 2015. 1300 p. (In Russ.).
30. *Kantorovich L.V.* Mathematical methods in the organization and planning of production. Publ. house of the Leningrad University; Transl. in Management Science. 1960;6:366-422.
31. *Bushansky S.P., Vasilieva E.M., and Livchits V.N.* Optimization Transport Computations. Advances in Economics and Optimization: collected scientific studies dedicated to the memory of L.V. Kantorovich. N.Y.: Nova Science Publishers Inc. 2014. P. 19-36.
32. Methodological recommendations for the evaluation of the effectiveness of investment projects. (Approved by the Ministry of Econ. Development of RF, the Ministry of Finance of RF, the State Constr. Committee of RF 21.06/1999 № BK 477). 271 p. (In Russ.).
33. Methodological recommendations for the evaluation of the effectiveness of the investment projects. Third edition revised and expanded. 2008. 248 p. (In Russ.).
34. *Bushansky S.P.* Inefficiency of road concessions in Russia: an exception or a rule? Jurnal novoi ekonomiceskoi assotciatii. 2021;2(50):97-118. DOI: 10.31737/2221-2264-2021-50-2-5 (In Russ.).
35. *Mamun M.S., Siddique A., and Rahman S.M.R.* Comparison of user equilibrium (UE) and system optimum (SO) traffic assignment methods for auto trips. Proceedings of Int. conf. on recent innovation in civil engineering for sustainable development (IICSD-2015). 2015. P. 736-740.
36. *Boyce D., and Xiong Q.* User-optimal and system-optimal route choices for a large road network. Review of Network Economics. 2004;3(4):371-380.
37. *Belousova N.I., and Bushanskij S.P.* On the implementation of tasks for diagnosing natural monopoly properties and mechanisms of economic behavior on networks. VIIIth science-practical (International) Conference "Trends in the development of the Internet and the digital economy" Proceedings. Simferopol-Alushta. 2025. P. 6-10 (In Russ.).

**Natalia I. Belousova.** Leading Researcher, Doctor (Economy), Federal Research Center "Computer Science and Control" of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia. E-mail: natabel.52@mail.ru; NBelousova@frcsc.ru

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