



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 73 за 2011 г.



Агапова Г.И., Гавдаева А.В.,  
Степанцов М.Е.

Моделирование динамики  
развития железнодорожных  
сетей

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Агапова Г.И., Гавдаева А.В., Степанцов М.Е. Моделирование динамики развития железнодорожных сетей // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 73. 12 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-73>

## ВВЕДЕНИЕ

Транспортные сети, их характеристики и возможности по перевозке грузов всегда являлись одним из определяющих факторов социально-экономического развития отдельных населенных пунктов, регионов и целых стран. Таким образом, адекватное моделирование социально-экономической динамики невозможно без того, чтобы описать математически развитие транспортной инфраструктуры и учесть взаимное влияние транспортной сети и всей экономической системы в целом.

Следует отметить, что большая часть моделей транспортных систем ориентирована на построение при заданных условиях и параметрах системы оптимального в том или ином смысле плана перевозок. В таких моделях подразумевается, что все функционирование транспортной сети управляется из одного центра. При этом либо решается просто задача оптимизации перевозок в рамках существующей неизменной сети (например, [1]), либо изменения в структуре транспортной сети, ее развитие также рассматриваются как результат принятия некоего решения центром управления транспортной сетью и реализации этого решения [2], [3].

Между тем, в условиях наличия большого количества хозяйствующих субъектов эти предположения нельзя считать верными. В этом случае и схема перевозок, и процесс развития транспортной сети складываются из одновременных независимых друг от друга действий этих субъектов. При этом действия не являются ни полностью скоординированными, ни совершенно случайными.

Именно такой подход использован в [4]. Предлагаемая модель является попыткой описать на языке математики процесс самоорганизации (возникновения и развития) транспортной сети, происходящий не на основании некоторого единого плана, а самопроизвольно складывающийся при заданных географических условиях и параметрах спроса и предложения нескольких видов товаров.

Основной идеей модели является введение для каждого вида товаров величины, названной потенциалом. Потенциал численно характеризует потребность в данном товаре, существующую в данном узле транспортной сети. Именно разность потенциалов между узлами и создает в модели потоки товаров.

Модель представляет собой полный граф, каждой вершине и каждому ребру которого приписан определенный набор параметров и переменных. Вершины моделируют узлы сети и характеризуются следующими величинами

1. Размер узла  $V_i$ .
2. Выпуск продукции вида  $k$   $P_{ik}$  (отрицательное значение означает спрос на продукцию).
3. Потенциал продукции каждого вида  $\varphi_{ik}$

Ребрам графа, изображающим транспортные коммуникации, связывающие населенные пункты, поставлены в соответствие следующие величины:

1. Длина  $L_{ij} > 0$
2. Коэффициент затрат на расширение  $Q_{ij}$
3. Пропускная способность  $W_{ij} \geq 0$
4. Поток продукции вида  $k - S_{ijk}$ .

Кроме этого, модель характеризуется глобальными параметрами «коэффициент проторенного пути»  $N > 1$  и «коэффициент роста узлов»  $G > 0$ . Первый из них показывает, во сколько раз затраты на прокладывание новой дороги с некоторой пропускной способностью превышают затраты на расширение существующей дороги на ту же величину.

Динамика модели реализована с использованием дискретного времени, шаг которого можно условно положить эквивалентным году реального времени – традиционному для экономики отчетному и плановому периоду. В связи с этим возникла известная методологическая проблема, свойственная, например, традиционным разностным схемам – дискретный характер пространства и времени противоречил бы континуальным свойствам переменных. Поэтому уместно было положить, что все величины (кроме коэффициентов  $Q_{ij}$ ,  $N$ ,  $G$ , не являющихся переменными модели) также могут принимать только целые значения.

Начальное состояние модели задается набором значений  $V_i$ ,  $P_{ik}$ ,  $L_{ij}$ ,  $Q_{ij}$ ,  $W_{ij}$  и глобальных параметров. Пошаговое изменение состояния модели осуществляется в два этапа, которые носят принципиально различный характер. Первый этап состоит в установлении схемы перевозок товаров при существующих значениях спроса, предложения и возможностях транспортировки. Следует отметить, что в рамках модели эта схема складывается не путем выбора оптимального (в каком-либо смысле) способа перевозок, а через самопроизвольное установление маршрутов перевозки, каждый из которых «закрывает» некоторую часть спроса на данный вид товара.

Номер вида продукции  $k$  играет роль индикатора значимости продукции. На каждом шаге алгоритма для каждого значения  $k$ , меняющегося от 1 (номер наиболее значимой продукции) до максимального (номер наименее значимой продукции), в каждой вершине рассматривалась задача оптимизации:

$$|\varphi_{ik}| \mapsto \min \tag{1}$$

при ограничениях

$$\forall j \sum_k |S_{ijk}| \leq W_{ij}, \tag{2}$$

где значения потенциалов заданы выражением

$$\varphi_{ik} = \sum_j S_{ijk} + P_{ik} \tag{3}$$

К задаче (1), (2) применяем следующий метод. Поскольку  $S_{ijk} \in Z$ , то для каждого значения  $k$  значение  $S_{ijk}$  увеличивалось на 1, если  $\varphi_{ik} > \varphi_{jk}$  или уменьшалось в обратном случае, и не меняется при равенстве потенциалов. При переборе ребер приоритет отдается ребрам с наибольшей разностью потенциалов между вершинами. Если для данного ребра итерационный процесс останавливается из-за нарушения условия (2), будем говорить, что имеет место перегрузка ребра.

Следует отметить, что такой алгоритм, применяемый для каждого вида товаров, нельзя строго назвать решением задач (1, 2). Он как раз и моделирует спонтанное установление торговых маршрутов между вершинами транспортной сети.

После этого осуществляется изменение параметров вершин и ребер. Размер вершин является также динамической величиной и меняется в зависимости от уровня потока товаров через данную вершину.

$$\forall i : V_i' = \left[ V_i \left( 1 + G \sum_{j,k} S_{ijk}^2 \right) \right]. \quad (4)$$

При изменении размера вершины выпуски продукции всех видов в этой вершине изменяются пропорционально.

Для всех ребер, на которых возникла перегрузка, проверяется возможность увеличения их пропускной способности. При выполнении условия

$$\frac{V_i + V_j}{2L_{ij}Q_{ij}} \geq 1 \quad (5)$$

осуществляется увеличение пропускной способности ребра

$$W_{ij}' = W_{ij} + \left[ \frac{V_i + V_j}{2L_{ij}Q_{ij}} \right]. \quad (6).$$

В случае, если изначально пропускная способность ребра равна 0 (дорога отсутствует), приведенные формулы модифицируются следующим образом:

$$\frac{V_i + V_j}{2L_{ij}Q_{ij}N} \geq 1; \quad (5a)$$

$$W_{ij}' = W_{ij} + \left[ \frac{V_i + V_j}{2L_{ij}Q_{ij}N} \right]. \quad (6a).$$

Таким образом, модель представляет собой самоорганизующуюся систему с обратной связью (структура сети определяет схему перевозок, а схема перевозок влияет на изменение структуры сети).

Особенности предлагаемой модели позволяют использовать ее для исследования взаимного влияния экономики территории и расположенной на этой территории транспортной системы, например, сети железных дорог.

Предложенный подход был применен для моделирования в железнодорожных системах России и Украины. Следует указать, что необходимые для построения соответствующих моделей первичные данные (например, объемы существующих перевозок) являются секретными или вовсе отсутствуют. В связи с этим калибровка модели в обоих случаях проводилась на основе оценок необходимых величин, исходя из доступных вторичных данных [5], [7], [9].

Такое внимание, уделенное нами именно железнодорожному транспорту, обусловлено двумя его чертами, дающими ему преимущества перед другими видами транспорта. Это пространственно-временная универсальность (возможность строительства коммуникаций в требуемом месте и функционирование в течение всего года, в отличие, например, от речного транспорта) и относительная дешевизна перевозок по сравнению с другими универсальными видами транспорта (например, автомобильным). Эти особенности приводят к тому, что именно железные дороги одним из основных факторов, влияющих на социально-экономическое развитие и обеспечивающих сохранение целостности страны или региона.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СИСТЕМЫ РОССИИ

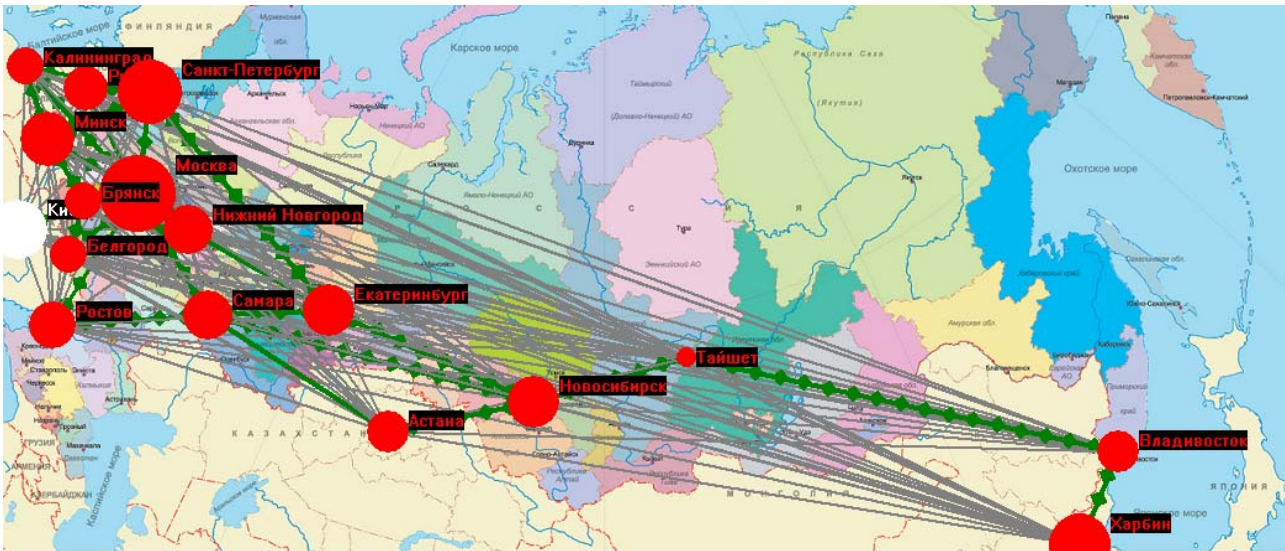
При построении модели российской железнодорожной системы рассматривались только основные железнодорожные магистрали нашей страны, по которым осуществляется основной объем перевозок (по данным [6]).

В качестве видов продукции, используемых в модели, были выбраны следующие группы товаров:

1. лесоматериалы;
2. металлы;
3. нефть и нефтепродукты;
4. товары народного потребления.

В качестве вершин графа в модели были выбраны основные железнодорожные узлы России, а также 5 городов сопредельных стран, с которыми осуществляется наибольший объем трансграничных перевозок. Размеры узлов были зада-

Узел	Размер
Москва	203
Петербург	89
Брянск	8
Новосибирск	27
Тайшет	1
Белгород	7
Владивосток	12
Самара	22
Екатеринбург	26
Нижний Новгород	25
Ростов-на-Дону	20
Калининград	8
Киев	54
Минск	35
Рига	14
Астана	12
Харбин	63



**Рис.1. Граф модели на фоне карты России**

Начальное состояние.

Жирные линии – действующие коммуникации, маркеры на линиях – символ перегрузки.

ны пропорционально населению перечисленных городов. При всей спорности такого способа задания размеров узлов, именно он был признан наиболее адекватным.

Выпуски продукции каждого вида для каждого узла были оценены, исходя из открытых данных об объемах производства продукции в соответствующих регионах, а также о ее импорте и экспорте.

Данная модель была использована для «проигрывания» ряда сценариев развития железнодорожной системы России.

Узел	Размер
Москва	680
Петербург	323
Брянск	204
Новосибирск	312
Тайшет	17
Белгород	232
Владивосток	112
Самара	318
Екатеринбург	263
Нижний Новгород	309
Ростов-на-Дону	194
Калининград	117
Киев	454
Минск	399
Рига	121
Астана	214
Харбин	215

### ***1. Развитие, исходя из существующей на данный момент ситуации***

Прогнозирование осуществлялось на срок до 50 лет. Полученные в итоге размеры узлов приведены в следующей таблице.

Результаты расчета данного сценария, основанного на исходной модели без каких-либо внесенных в нее изменений, использовались в дальнейшем для сравнения, в качестве базового, то есть «контрольного образца».

Тем не менее, следует отметить, что в данном сценарии наблюдается постепенное сокращение перегрузки железных дорог, с окончательным решением этой проблемы к концу срока. Наибольшее позитивное влияние транспорт-

ем этой проблемы к концу срока. Наибольшее позитивное влияние транспорт-

ная сеть оказывает на развитие Москвы, дальневосточного региона и западных приграничных территорий.

## **2. Отсутствие железнодорожного сообщения с Дальним Востоком**

Сценарий реализуется удалением из системы узла Тайшет.

Несмотря на прекращение сообщения по весьма загруженной магистрали и первоначальных проблем с функционированием системы, уже через 10 лет развитие узлов сети выходит на уровень, полученный в сценарии 1. В таблице приведены результаты моделирования через 50 лет.

Принципиальное отличие полученных результатов от базового сценария состоит лишь в том, что снабжение товарами узла Владивосток осуществляется исключительно через узел Харбин. Однако это не оказывает заметного влияния на развитие системы. Таким образом, можно сделать вывод, что железнодорожное сообщение с Дальним Востоком является не столько крайней экономической необходимостью, сколько средством сохранения целостности России в этом регионе.

<b>Узел</b>	<b>Размер</b>
Москва	672
Петербург	333
Брянск	194
Новосибирск	329
Белгород	218
Владивосток	103
Самара	317
Екатеринбург	293
Нижний Новгород	320
Ростов-на-Дону	191
Калининград	115
Киев	443
Минск	389
Рига	125
Астана	209
Харбин	208

## **3. Прекращение железнодорожных перевозок на Украину и в Белоруссию**

Сценарий реализуется удалением из системы узлов Минск и Киев. Расчет ведется в течение 50 лет.

<b>Узел</b>	<b>Размер</b>
Москва	557
Петербург	312
Брянск	147
Новосибирск	314
Тайшет	19
Белгород	141
Владивосток	112
Самара	256
Екатеринбург	245
Нижний Новгород	267
Ростов-на-Дону	124
Калининград	131

<b>Узел</b>	<b>Размер</b>
Рига	142
Астана	211
Харбин	220

В описанной ситуации экономическое развитие значительной части узлов, особенно на европейской территории России замедляется по сравнению со сценарием 1. Сохранение нормального железнодорожного сообщения с указанными странами важно, особенно с учетом анализа аналогичной модели, касающейся Украины.

#### ***4. Прекращение железнодорожного сообщения с Калининградом***

Сценарий реализуется удалением из системы узла Калининград. Расчет ведется в течение 50 лет.

<b>Узел</b>	<b>Размер</b>
Москва	480
Петербург	407
Брянск	189
Новосибирск	301
Тайшет	15
Белгород	219
Владивосток	112
Самара	303
Екатеринбург	259
Нижний Новгород	297
Ростов-на-Дону	193
Киев	531
Минск	467
Рига	149
Астана	211
Харбин	223

Прекращение железнодорожного сообщения с Калининградом приводит к замедлению развития практически всех узлов, в первую очередь Москвы. С другой стороны, узлы, соответствующие альтернативным маршрутам перевозок в Европу (Киев, Минск, Петербург), наоборот, начнут развиваться быстрее.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СЕТИ УКРАИНЫ**

В качестве видов продукции, используемых в модели, были выбраны следующие группы товаров:

1. металл;
2. уголь;
3. сельскохозяйственная продукция.



В качестве вершин графа в модели были выбраны основные железнодорожные узлы Украины (по данным [8]):

Узел	Размер
Ковель	4
Львов	4
Коростень	4
Жмеринка	2
Киев	147
Бахмач	1
Одесса	54
Николаев	27
Полтава	17
Харьков	76
Лозовая	3
Днепропетровск	53
Запорожье	41
Донецк	53
Луганск	25

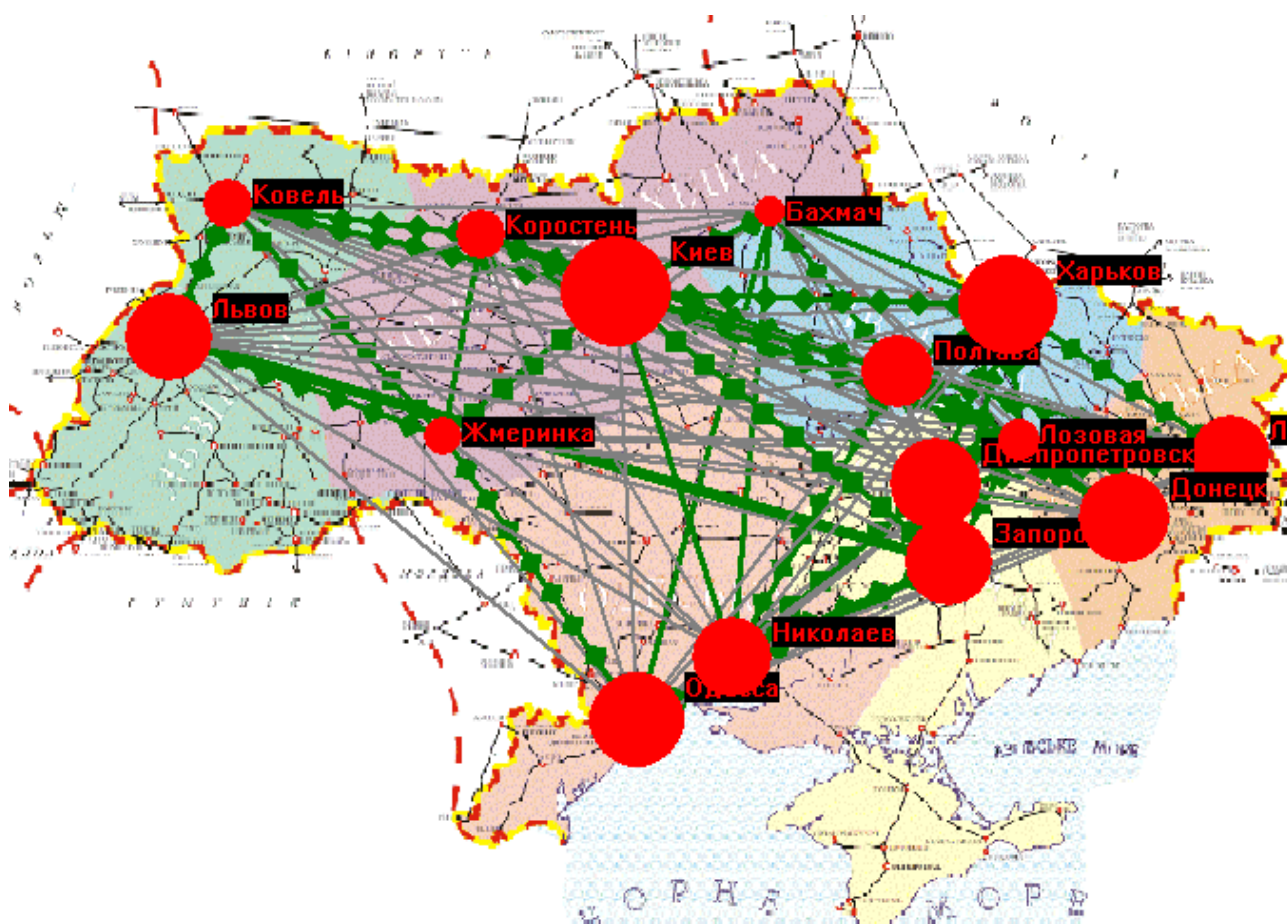


Рис.2. Граф модели на фоне карты Украины

Начальное состояние.

Жирные линии – действующие коммуникации, маркеры на линиях – символ перегрузки.

Размеры узлов и выпуски продукции каждого вида для каждого узла были оценены тем же способом, что в случае России.

Как и в предыдущем случае, вначале был рассмотрены сценарий развития сети железных дорог, исходя из существующей на данный момент ситуации, затем сценарий прекращения железнодорожного сообщения с европейскими странами и, наконец, сценарий прекращения железнодорожного сообщения с Россией.

При моделировании развития железнодорожной системы Украины ограничения вводились путем изменения значений выпусков продукции в узлах, являющихся перевалочными пунктами при железнодорожном сообщении соответственно с Россией и Европой. То есть, значения выпусков в таких узлах приводились к значениям, определяемым только внутренним спросом на данную продукцию, без учета экспорта или импорта (которые учитывались в исходной модели).

Во всех трех случаях страна справляется с перегрузками железных дорог через 40-50 лет, считая от настоящего времени. В таблице приведены результаты расчета базового сценария после 50 лет.

<b>Узел</b>	<b>Размер</b>
Ковель	25
Львов	47
Коростень	11
Жмеринка	25
Киев	200
Бахмач	33
Одесса	128
Николаев	29
Полтава	33
Харьков	203
Лозовая	54
Днепропетровск	53
Запорожье	52
Донецк	103
Луганск	37

В обоих случаях, когда перевозки были ограничены, существенного влияния на динамику развития системы такие ограничения не оказали. Единственным заметным отличием является более быстрое развитие Одессы в рамках сценарии с ограничением перевозок в Европу. Тогда этот порт становится наиболее очевидным альтернативным маршрутом перевозки и развивается быстрее.

<b>Узел</b>	<b>Размер</b>
Ковель	23
Львов	45
Коростень	12
Жмеринка	28

Узел	Размер
Киев	195
Бахмач	32
Одесса	162
Николаев	40
Полтава	31
Харьков	199
Лозовая	52
Днепропетровск	55
Запорожье	51
Донецк	95
Луганск	39

Во всем остальном наличие или отсутствие грузовых железнодорожных перевозок между Украиной и ее соседями не оказывает заметного влияния на экономическое развитие страны.

Следует упомянуть, что во всех рассматриваемых моделях речь шла только о грузовых перевозках, пассажирские не рассматривались.

Подводя итог, отметим, что, используя предложенную модель, мы получили приведенные выше интересные результаты, носящие, однако, исключительно качественный характер. Исследовать же количественные характеристики различных транспортных сетей представляется возможным только с использованием для калибровки моделей точных (а не оценочных) исходных данных.

## Литература

1. *Бутов А.С., Гаскаров Д.В., Егоров А.Н., Крупенина Н.В.. Под ред. Бутова А.С.* Транспортные системы. Моделирование и управление. СПб.: Судостроение, 2001. 552 с.
2. *Попков Ю.С. и др.* Системный анализ и проблемы развития городов. М.: 1983.
3. *Лившиц В.В.* Математическая модель случайно-детерминированного выбора и ее применение для расчета трудовых корреспонденций. // Автоматизация процессов градостроительного проектирования. Сборник. М.: ЦНИИП градостроительства. 1973. С. 39-57.
4. *Малинецкий Г. Г., Степанцов М. Е.* Дискретная математическая модель динамического развития транспортной сети // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2009. - Том 49, N 9. - С.1565-1570.
5. Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации. - <http://www.gks.ru/>
6. Официальный сайт ОАО "РЖД". - <http://www.rzd.ru/>
7. Государственный комитет статистики Украины. - <http://www.ukrstat.gov.ua/>
8. Официальный сайт украинских железных дорог. - <http://www.uz.gov.ua/>
9. Импортёры и экспортёры Украины. - <http://eximbase.com/>