

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ  
СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ РОССИИ И УКРАИНЫ\*

М. Е. Степанцов (Москва)

Проблема моделирования транспортных перевозок, проектирования и организации функционирования транспортных сетей далеко не нова. Однако большая часть существующих моделей транспортных систем ориентирована на решение одного и того же, пусть и крайне важного, вопроса о построении 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]. Между тем, в условиях наличия большого количества хозяйствующих субъектов эти предположения нельзя считать верными.

В [3] была предложена модель, описывающая 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  $\phi_{ik}$ .

Ребрам графа, изображающим транспортные коммуникации, связывающие населенные пункты, соответствуют 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 континуаль-

\* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 11-06-00193-а.

ном 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:

$$|\varphi_{ik}| \mapsto \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$\forall j \sum_k |S_{ijk}| \leq W_{ij}, \quad (2)$$

где значения потенциалов заданы выражением

$$\varphi_{ik} = \sum_j S_{ijk} + P_{ik} \quad (3)$$

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 на втором этапе шага по времени осуществляется изменение параметров вершин и ребер. Размер вершин является также динамической величиной и меняется в зависимости от уровня потока товаров через данную вершину. При изменении размера вершины выпуски продукции всех видов в этой вершины изменяются пропорционально.

Для всех ребер, на которых возникла перегрузка, проверяется возможность увеличения их пропускной способности, и при наличии такой возможности пропускная способность увеличивается.

Более подробное описание модели, а также примеры тестовых расчетов приведены в [4].

Таким образом, на каждом шаге устанавливается некоторое распределение потоков товаров, не являющееся ни равновесным, ни оптимальным в классическом смысле этих терминов, а стихийно складывающееся на основе структуры спроса и предложения данного вида продукции в узлах сети.

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.

### **Моделирование железнодорожной системы России**

При построении модели российской железнодорожной системы рассматривались только основные железнодорожные магистрали нашей страны, по которым осуществляется основной объем перевозок.

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 приграничных стран, с которыми осуществляется наибольший объем трансграничных перевозок.

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

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

При прогнозировании на период до 50 лет, считая от 2009 года, наблюдается постепенное сокращение перегрузки железных дорог, с окончательным решением этой проблемы к концу срока. Наибольшее позитивное влияние транспортная сеть оказывает на развитие Москвы, дальневосточного региона и западных приграничных территорий.

2. Отсутствие железнодорожного сообщения с Дальним Востоком.

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, за тем лишь исключением, что снабжение товарами Владивостока осуществляется через Харбин. 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.

3. Прекращение железнодорожных перевозок на Украину и в Белоруссию.

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.

Если в модели удалить узел Калининград, это приведет к замедлению (по сравнению со сценарием 1) 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.

Как и в случае с Россией, вначале был рассмотрен сценарий развития сети железных дорог, исходя из существующей на данный момент ситуации. Затем в рамках модели было закрыто сообщение с европейскими странами и Россией соответственно.

Во всех трех случаях страна справится с перегрузками железных дорог через 40–50 лет, считая от настоящего времени. В обоих случаях ограничения перевозок существенного влияния на динамику развития системы не оказали. Единственным отличием является более быстрое развитие Одессы в рамках сценария с ограничением перевозок в Европу. Тогда этот порт становится наиболее очевидным альтернативным маршрутом перевозки и развивается быстрее. Во всем остальном наличие или отсутствие грузовых перевозок между Украиной и ее соседями не оказывает заметного влияния на экономическое развитие страны.

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

Подводя итог, отметим, что, используя предложенную модель, мы получили ряд интересных качественных результатов. Разумеется, говорить о количественных характеристиках не представляется возможным без использования для калибровки моделей точных (а не оценочных) исходных данных.

### Литература

1. **Бутов А. С., Гаскаров Д. В., Егоров А. Н., Крупенина Н. В.** Транспортные системы. Моделирование и управление / Под ред. Бутова А.С. СПб.: Судостроение, 2001.. 552 с.
2. **Попков Ю. С., Посохин М. В., Гутнов А. Э., Шмульян Б. Л.** Системный анализ и проблемы развития городов. М.: Наука, 1983. 512 с.
3. **Малинецкий Г. Г., Степанцов М. Е.** Дискретная математическая модель динамического развития транспортной сети // Журнал вычислительной математики и математической физики, 2009. Т. 49, N 9. С. 1565–1570.
4. **Степанцов М. Е.** Динамическая модель развития транспортной сети. Препринт Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2008. № 79.