

УДК 656.13:625.7

## ОЦЕНКА АДЕКВАТНОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА СЕТИ

Н.А. Семченко, ст. преподаватель, ХНАДУ

*Аннотация.* Разработан экспериментально-аналитический метод определения параметров транспортных потоков на сети и проведена оценка его адекватности.

*Ключевые слова:* транспортные потоки, экспериментально-аналитический метод.

## ОЦІНКА АДЕКВАТНОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ НА МЕРЕЖІ

Н.О. Семченко, ст. викладач, ХНАДУ

*Анотація.* Розроблено експериментально-аналітичний метод визначення параметрів транспортних потоків на мережі і проведено оцінку його адекватності.

*Ключові слова:* транспортні потоки, експериментально-аналітичний метод.

## ADEQUACY ASSESSING OF THE OF EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL METHOD FOR TRAFFIC FLOWS PARAMETERS DETERMINATION AT NETWORK

N. Semchenko, senior lecturer, KhNAHU

*Abstract.* Developed experimental and analytical method for measuring traffic flows on the network and conducted its evaluation of adequacy.

*Key words:* transport flows, experimental and analytical method.

### Введение

Непрерывно растущая транспортная нагрузка на улично-дорожные сети (УДС) больших городов (мегаполисов) и особенно их центральной части привела к тому, что УДС работают с перенапряжением, о чем свидетельствуют систематически возникающие предзаторовые и заторовые ситуации, растущее количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Все это вызывает необходимость совершенствования организации дорожного движения (ОДД), обеспечения достаточной пропускной способности существующей улично-дорожной сети, повышения эффективности транспортного обслуживания городов и безопасности дорожного движения (БДД).

Для совершенствования и управления дорожным движением большое значение имеет оперативная информация о сложившемся распределении транспортных потоков на сети.

Оперативное управление движением на элементах транспортной сети возможно при наличии информации об интенсивности движения. Сбор такой информации с помощью детекторов транспорта требует использования большого количества самих детекторов, что приводит к удорожанию мониторинга.

Поэтому особый интерес представляет разработка экспериментально-аналитического метода, при котором параметры транспортных потоков на всех элементах сети определяются расчетным путем на основании экс-

периментального определения значений интенсивности движения на основных входах в исследуемую сеть и отдельных локальных объектах внутри нее.

### Анализ публикаций

Методам моделирования распределения транспортных потоков посвящено большое количество работ [1–8]. Основными составляющими таких моделей являются:

- формализованное представление сети в виде графа;
- целевая функция, вид которой определен поведением участников движения и зависимостями стоимости проезда по дугам сети как функции интенсивности движения;
- ограничения задачи.

При моделировании распределения потоков [9] наиболее сложным является установление маршрутов, по которым следуют корреспонденции из одной зоны в другую. Такая информация представляется в виде матрицы, элементы которой являются долей корреспонденций между зонами, использующих дугу сети.

В зависимости от плотности сети существуют экзогенный (вызываемый внешними факторами) и эндогенный (вызываемый внутренними факторами) методы определения матрицы распределения транспортных потоков:

- пропорциональное распределение;
- равновесное распределение.

При пропорциональном распределении объем движения не зависит от транспортной пропорции. Объем движения по перегону пропорционален потоку из одного района в другой. Пропорция водителей, выбирающих маршрут, не будет зависеть от скоплений транспортных средств на сети, а только от характеристик маршрута и водителя. Значения транспортных пропорций могут быть заданы изначально.

Наиболее простым методом распределения потоков по сети, относящегося к пропорциональному распределению, является бескомпромиссный метод (all-or-nothing – «все или ничего»), когда весь объем каждой корреспонденции накладывается на единственный оптимальный маршрут, соединяющий два района. Такой способ не учитывает есте-

ственное рассеивание транспортных потоков и использует только один кратчайший путь, даже при наличии других кратчайших путей. Для устранения этого недостатка предложены различные способы расчета нескольких альтернативных путей и рассеивания транспортных потоков по этим путям. В [10] предложена методика построения дерева возможных путей из всех узлов сети в некоторый фиксированный узел прибытия. Недостатком данного метода распределения потоков также является использование кратчайших путей.

При распределении транспортных потоков на сети с учетом скопления транспортных средств используют более реалистичный подход – равновесное распределение. Цена поездки (время проезда, транспортные затраты и т.д.) зависит от объема потока, т.е. является функцией от интенсивности. В качестве основных гипотез поведения участников движения в этих моделях распределения потоков используются принципы Wardrop [11]. В соответствии с первым принципом каждый участник движения выбирает маршрут с наименьшими индивидуальными затратами на поездку. При распределении потоков по сети в конце концов наступает состояние равновесия, при котором ни один участник не может уменьшить время своей поездки в результате изменения маршрута (user – equilibrium assignment, UE-модель). Недостатком такой модели является то условие, что матрица корреспонденций задана и является исходными данными моделирования распределения потоков, а ее элементы входят в ограничения задачи оценки равновесного распределения.

Статическая модель равновесия основана на детерминированном поведении водителей. Она предполагает, что водители имеют точное представление о потоках и задержках на всех дугах сети, одинаково оценивают пути и принимают точные решения при выборе пути следования. Но в реальной жизни поведение водителей стохастично, содержит элемент случайности. Этот элемент случайности поведения водителей учитывают модели стохастического равновесного распределения (Stochastic user equilibrium assignment, SUE-модель).

В динамических равновесных моделях распределения потоков добавляется переменная – время. В этих моделях для того, чтобы от-

слеживать точное время проезда, необходимо описание условий движения внутри дуги с помощью имитационных моделей.

Все выше рассмотренные модели сводятся к определению оптимальных маршрутов следования.

В работе Михайлова А.Ю. [7] разработан метод, пригодный для получения оценок корреспонденций для условий, указанных ниже:

- рассматривается детализированная улично-дорожная сеть, включая отдельные потоки по разным направлениям на перекрестках;
- исходными данными являются замеры интенсивности движения в отдельных пунктах улично-дорожной сети (т.е. на перекрестках, на перегонах), выполняемые в определенное время в будние дни;
- данные об интенсивности движения содержат ошибки, вызванные проведением замеров в разные дни, и ошибки самих подсчетов интенсивности движения.

Отличительными особенностями сформулированной задачи восстановления матрицы корреспонденций, которые связаны с видом и качеством исходных данных, являются:

- детальное рассмотрение улично-дорожной сети в виде ориентированного графа, для каждой дуги которого обследованиями устанавливается значение интенсивности движения;
- используются данные обследований только интенсивности движения (подсчет количества транспортных средств учетных видов с последующим определением приведенной интенсивности движения);
- матрицы корреспонденций между выделенными пунктами улично-дорожной сети определяются методами математической статистики, устойчивыми к выбросам, т.е. с помощью так называемого робастного регрессионного анализа.

Недостатки данного подхода:

- рассматриваемый участок УДС представляется в виде набора графов, в которых каждая корреспондирующая пара вершин будет иметь только один маршрут. Другими словами, декомпозиция сводится к разделению изучаемого участка УДС на графы, для определения матриц которых можно использовать распределение по маршрутам «все или ничего» (all or nothing). Такой метод предпо-

лагает определение целого набора матриц корреспонденции для выделенных подграфов, но при этом возрастает трудоемкость работ на стадии статистической обработки;

- сбор информации об интенсивности движения необходимо проводить для каждой дуги сети, являющейся входом на маршрут, что является сложным и дорогостоящим мероприятием.

В работе Луканина В.Н. [8] описывается алгоритмическая и программная реализация математических моделей транспортных потоков на дорожной сети Москвы и распространения загрязнений от автомобильных выхлопов в атмосфере над территорией города.

Граф УДС состоит из выделенных точек пересечения магистралей (вершин) и ребер их соединяющих (дуг) и характеризуется:

- числом вершин и ребер;
- матрицей геометрических координат вершин графа;
- матрицей инцидентности ребер графа, задающей связи между вершинами;
- матрицей перемешивания в узлах.

Транспортный поток на перекрестке характеризуется:

- топологией проекции соответствующего узла графа;
- матрицей перемешивания – матрицей вероятностного типа, в которой элементами являются доли транспорта, подходящего с  $j$ -го направления и направляющегося по  $i$ -й улице;
- матрицей пропускных способностей.

Для каждого ребра задано суммарное число полос в обе стороны.

Источники транспортных потоков по пространственной привязке делятся на две группы:

- точечные – такие, для которых включение транспортных средств в транспортные потоки происходит на конкретном ребре графа УДС (например, автопарк – объект с конкретным адресом, которому соответствует определенное ориентированное ребро исследуемого графа);
- распределенные – которые можно рассматривать как единый источник с суммарной мощностью, объединяющей мелкие источники, пространственное расположение которых плотно заполняет некоторую часть территории города (например, «спальный» район).

Задание крупных притягивающих центров транспортных потоков делится на следующие группы по форме связей «источник–сток»:

- для источника имеется конкретный сток;
- для источника не существует конкретного стока, выходящие АТС могут свободно двигаться по всему графу (например, развязки МКАД).

Разработанная математическая модель и ее компьютерная реализация позволяет в реальном масштабе времени имитировать поведение транспортных потоков на УДС крупного города. В результате моделирования движения транспортных потоков на УДС в режиме реального времени рассчитывается плотность потоков на каждом ребре графа с целью оценки загрязнения внешней среды.

Недостатком данного подхода является то, что при выборе транспортным средством пути предполагается, что критерием является время перемещения, что не соответствует реальным условиям движения транспортных средств по сети.

#### Цель и постановка задачи

Целью работы является разработка модели распределения потоков на сети, не связанная с определением оптимального маршрута и использующая в качестве исходных данных данные интенсивности, полученные экспериментально, на входах в рассматриваемую сеть.

Для осуществления цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модель и методы робастной оценки распределения транспортных потоков на сети на основе обследования интенсивности движения на отдельных элементах сети;
- предложить методику подготовки исходных данных для оценки параметров транспортных потоков;
- на основе разработанной модели выполнить оценку эффективности предлагаемых методов определения параметров транспортных потоков на УДС на основе экспериментальных исследований.

#### Экспериментально-аналитический метод определения параметров транспортных потоков на сети

Базовый граф УДС состоит из вершин – перекрестков, а именно  $M_v$  вершин

$\{v_i, i = \overline{1, M_v}\}$  и ребер  $M_e$ , дорог, соединяющих вершины,  $\{e_j, j = \overline{1, M_e}\}$ .

Модель [13], в которой исходными данными является интенсивность, полученная эмпирически на входах в рассматриваемую сеть, имеет вид

$$N_j^{Pr} = \sum_{h \in H} \left( N_h^{Pi^{BXOD}} \sum_{l \in L} \prod_{\substack{p_i \in P, \\ p_i \neq p_r}} f_k^{p_i} d_k^{p_i} \right), \quad (1)$$

где  $H$  – множество входов в часть рассматриваемой улично-дорожной сети,  $H \subset K$ ;  $K$  – множество стоп-линий перекрестков на сети мегаполиса;  $N_h^{Pi^{BXOD}}$  – интенсивность на входе в сеть, полученная экспериментально, авт./ч,  $N_h^{Pi^{BXOD}} \geq 0$ ;  $L$  – множество путей от входов сети к рассматриваемой стоп-линии;  $P$  – множество подходов к перекрестку;  $P = \{p_i, i = \overline{1, n}\}$ ;  $j$  – номер перекрестка;  $p_r$  – номер подхода к рассматриваемому перекрестку;  $p_i$  – номер подхода предыдущего перекрестка, с которого  $N_k^{p_i}$ , авт./ч, вливается в  $N_j^{Pr}$ , авт./ч;  $f_k^{p_i}$  – вероятность осуществления маневра на перекрестке от предыдущей стоп-линии к той, что рассматривается

$$f_k^{p_i} = \begin{cases} a_k^{p_i}, & \text{прямо от стоп-линии } p_i, \\ b_k^{p_i}, & \text{направо от стоп-линии } p_i, \\ c_k^{p_i}, & \text{налево от стоп-линии } p_i, \end{cases} \quad (2)$$

$d_k^{\delta_i}$  – индекс запрещения

$$d_k^{p_i} = \begin{cases} 1, & \text{если маневр разрешен,} \\ 0, & \text{если маневр запрещен.} \end{cases} \quad (3)$$

Определение характеристик транспортных потоков на сети базируется на следующих положениях:

- матрица корреспонденций на существующей сети уже известна;
- на сети внедрена определенная организация движения;
- автомобиль может появиться у стоп-линии только один раз (то есть циклы исключены);

– соотношение направлений транспортных потоков на перекрестках остается приблизительно одинаковым для определенных временных интервалов (утренний и вечерний час «пик», межпиковый период и др.) и не зависит от интенсивности транспортного потока. Это положение, используемое при оборудовании локальных объектов техническими средствами регулирования, подтверждено рядом авторов и собственными исследованиями.

Целевая функция имеет вид

$$\sum_{h \in H^{\text{ВЫХ}}} (N_h^{\text{ВЫХ}} - N_h^{p, \text{ВЫХ}}) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $H^{\text{ВЫХ}}$  – множество выходов из рассматриваемой улично-дорожной сети,  $H^{\text{ВЫХ}} \subset H \subset K$ ;  $N_h^{\text{ВЫХ}}$  – интенсивность на выходе из сети, полученная экспериментально, авт./ч;  $N_h^{p, \text{ВЫХ}}$  – смоделированная интенсивность на выходе из сети, авт./ч.

Отличительными особенностями модели являются:

– в модели рассматриваются все возможные пути (при условии исключения появления транспортного средства у стоп-линии дважды) – от входов в сеть до любой стоп-линии на сети;

– модель является стохастической, т.к. учитывает реальное поведение водителей;

– нет необходимости учитывать размещение объектов, порождающих передвижения, места приложения труда, культурно-бытового обслуживания и др.

### Методика проведения эксперимента

Эксперимент проводился на сети Киевского района г. Харькова. Исследуемая сеть состояла из 27 узлов-перекрестков (рис. 1). Площадь исследуемой сети – 0,596 км<sup>2</sup>.

Эксперимент проводился в будний день, с 9<sup>00</sup> до 10<sup>00</sup>, с использованием видеонаблюдения. Аппаратура, установленная на каждом перекрестке исследуемой сети, регистрировала все направления входа и выхода транспортных средств в течение часа. Эксперимент проводился одновременно на всех пере-

крестках исследуемой сети. При обработке экспериментальных данных полученные данные разбивались на 5- и 15-минутные интервалы.

### Оценка адекватности экспериментально-аналитического метода

В результате обработки данных эксперимента были получены следующие параметры:

- состав транспортного потока;
- часовая (5-минутная, 15-минутная) интенсивность транспортных средств в физических единицах;
- часовая (5-минутная, 15-минутная) интенсивность транспортных средств в приведенных единицах (рис. 2);
- процентное соотношение потоков у стоп-линий.

Относительное отклонение интенсивности, %, для каждой дуги было рассчитано по формуле

$$\delta N_j^{pr} = \frac{|N_{jM}^{pr} - N_{j\Phi}^{pr}|}{N_{j\Phi}^{pr}} \cdot 100, \quad (5)$$

где  $N_{jM}^{pr}$  – интенсивность у стоп-линии, рассчитанная по модели, авт./ч;  $N_{j\Phi}^{pr}$  – фактическая интенсивность у стоп-линии, авт./ч.

Полученные результаты представлены на рис. 2.

Средневзвешенное отклонение, %, по сети

$$\delta N_{\text{СЕТИ}} = \frac{\sum_{j=1}^{M_e} |N_{jM}^{pr} - N_{j\Phi}^{pr}|}{\sum_{j=1}^{M_e} N_{j\Phi}^{pr}} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $M_e$  – количество дуг сети.

Для исследуемой сети  $\delta N_{\text{СЕТИ}} = 2,46\%$ , что не превышает допустимых 10%.

Следовательно, созданная модель транспортной сети является адекватной и пригодной для дальнейшего использования.



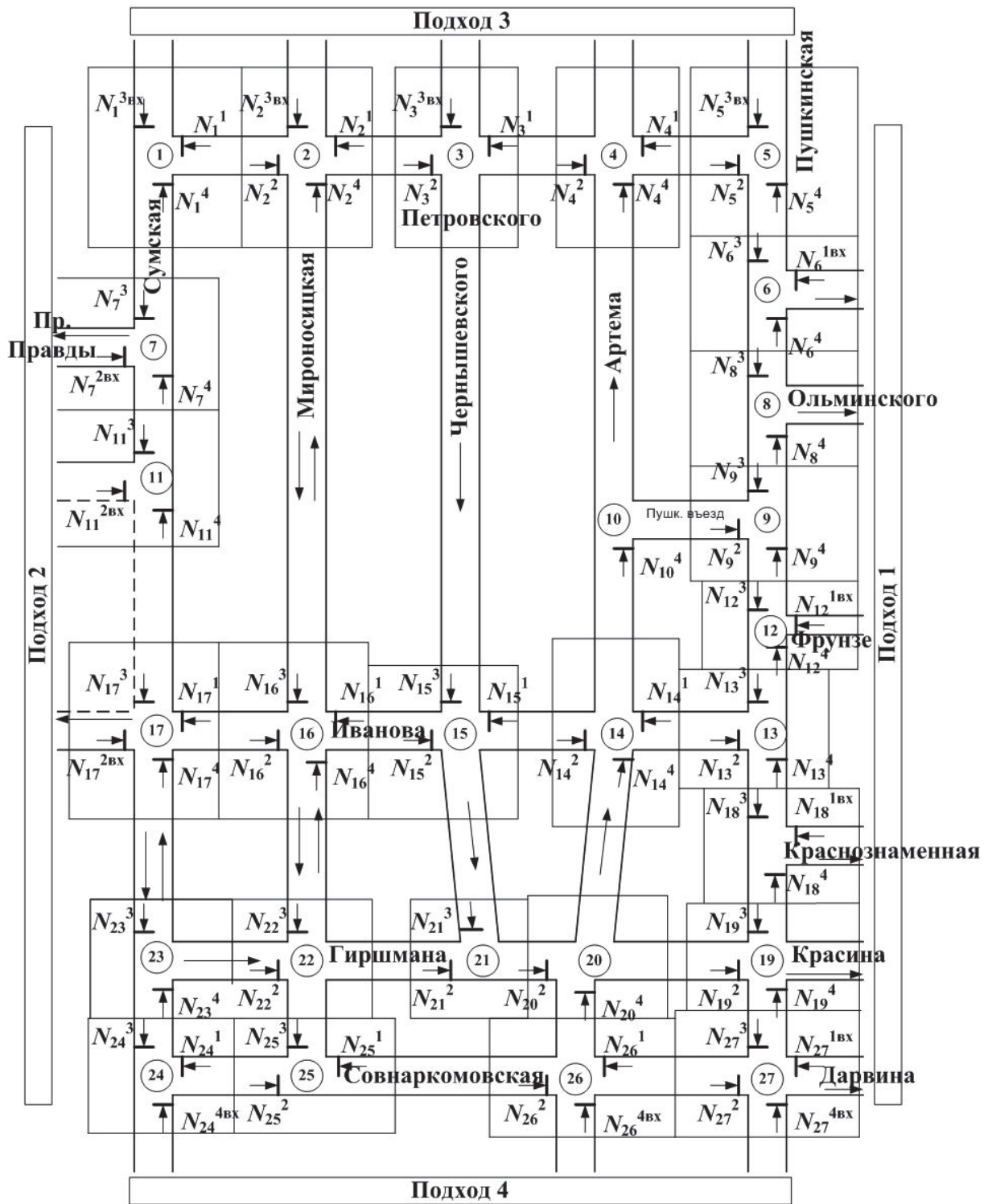


Рис. 1. Схема исследуемой сети

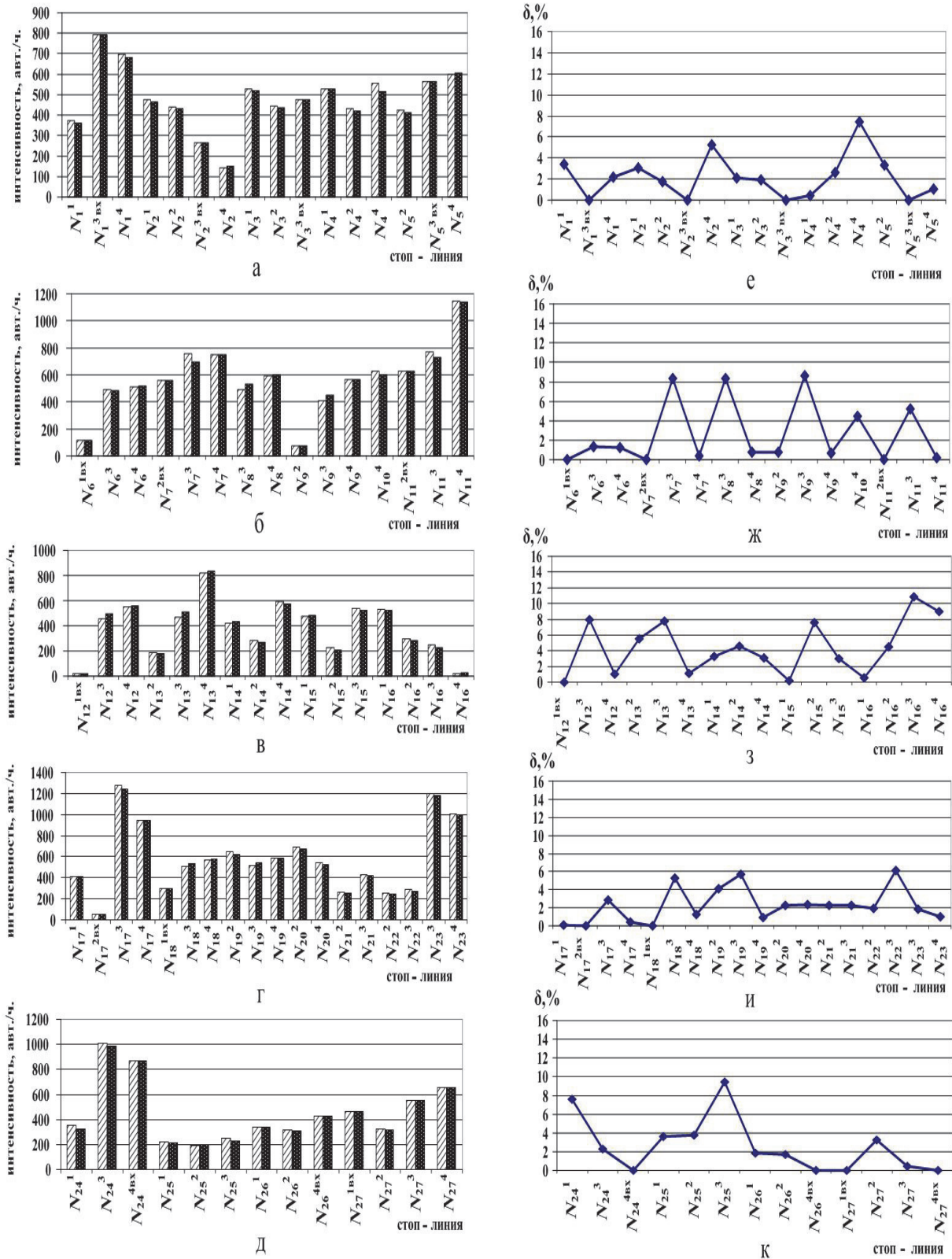


Рис. 2. Результаты проведения эксперимента: а – д – фактическая и смоделированная интенсивности у стоп-линий на сети: ▨ – интенсивность по модели; ■ – фактическая интенсивность; е – к – относительная погрешность модели у стоп-линий на сети

### Выводы

В ходе исследования разработана модель распределения потоков на сети, не связанная с определением оптимального маршрута и использующая в качестве исходных данных данные интенсивности, полученные экспериментально, на входах в рассматриваемую сеть.

Проведен натурный эксперимент на сети Киевского района г. Харькова, который подтвердил адекватность разработанной модели.

### Литература

1. Брайловский Н.О. Моделирование транспортных систем / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М.: Транспорт, 1978. – 125 с.
2. Брайловский И.О. Управление движением транспортных средств / Н.О. Брайловский, Б.И. Грановский. – М.: Транспорт, 1975. – 110 с.
3. Васильев Е.М. Оптимизация планирования и управления транспортными системами / Е.М. Васильев, В.Н. Игудин. – М.: Транспорт, 1987. – 208 с.
4. Васильев Е.М. Нелинейные транспортные задачи на сетях / Е.М. Васильев, Б.Ю. Левит, В.Н. Лившиц. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 104 с.
5. Имельбаев Ш.С. Анализ стохастических коммуникационных систем с применением термодинамического подхода / Ш.С. Имельбаев, Б.Л. Шмутьян // Автоматика и телемеханика. – 1977. – №5. – С. 77–87.
6. Иносэ Х. Управление дорожным движением / Х. Иносэ, Г. Хамада; под ред. М.Я. Блинкина; пер. с англ. – М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
7. Михайлов А.Ю. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов / А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Новосибирск: Наука, 2004. – 267 с.
8. Автотранспортные потоки и окружающая среда: учеб. пособие для вузов / В.Н. Луканин, А.П. Буслаев, Ю.В. Трофименко, М.В. Яшина; под ред. В.Н. Луканина. – М.: ИНФРА-М, 1998. – 408 с.
9. Abrahamson T. Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey / T. Abrahamson // IASA Interim Report IR-98-021/May. – 1998. – 27 p.
10. Яковлев Л.А. Пакет прикладных программ для проектирования систем городских путей сообщений / Л.А. Яковлев. – М.: ЦНИИП градостроительства, 1983. – С. 57–78.
11. Wardrop J.G. Some Theoretical aspects of Road Traffic Research / J.G. Wardrop // Proc. Institute of Civil Engineers, 1952. – Part II, Vol. 1. – P. 325–378.
12. Семченко Н.А. Эмпирико-стохастическое прогнозирование параметров транспортного потока на сети мегаполиса / Н.А. Семченко // Moderní vymoženosti vědy – 2013: materialy IX mezinárodní vědecko-praktická konference. – Praha. – 2013. – Díl 75. «Technické vědy». – S. 3–8.

Рецензент: М.А. Подригало, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 12 марта 2013 г.