

*Касаткина Екатерина Васильевна, кандидат физ.-матем. наук, доцент,  
Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашикова*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА ПРИМЕРЕ ДОРОЖНОЙ СИСТЕМЫ ОДНОГО ИЗ РАЙОНОВ ГОРОДА ИЖЕВСКА**

**Аннотация:** В работе представлена имитационная модель транспортных потоков в условиях светофорного регулирования. Рассмотрена система перекрестков центральной части города Ижевска. На основе предложенной модели оценки транспортных потоков построено распределение количества транспортных средств, находящихся в дорожной системе, от времени.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, транспортный поток, система перекрестков, светофорное регулирование, очередь.

**Annotation:** The paper presents a simulation model of traffic flows under traffic light regulation. The system of intersections in the Central part of Izhevsk is considered. Based on the proposed model for estimating traffic flows, the distribution of the number of vehicles in the road system over time is constructed.

**Key words:** mathematical modeling, traffic flow, intersection system, traffic light regulation, queue.

### *Введение*

Организация городских транспортных потоков является одной из важных проблем современных городов. Решение этого вопроса влияет на качество их жизнедеятельности и затрагивают интересы подавляющего большинства населения.

Темп роста числа личных автомобилей граждан в современных городах, как правило, опережает темп развития дорожной системы [1]. Отставание в

методах организации дорожного движения и развитии систем их управления приводит к возникновению сложных транспортных проблем. В этой связи возникают заторы и повышается аварийность на дорогах. Необходимость решения вопроса разгрузки транспортно-дорожных систем городов в настоящее время является актуальной задачей [2].

Существуют методы, которые позволяют устранить очереди на дорогах: внедрение специальных инженерно-технических сопровождений на перекрестках, многоуровневые развязки с полосами для торможения и разгона, уменьшение количества поворотов на дороге, дополнительные полосы на дороге для выезда на примыкающие дороги, расширение дорог и т.д. [3; 4].

Также эффективность функционирования городской транспортной системы во многом определяется режимами светофорного регулирования на перекрестках [5; 6].

Рассмотрим задачу моделирования транспортных потоков в условиях светофорного регулирования на примере дорожной системы одного из районов города Ижевск. Методология подхода к решению данной задачи частично представлена автором в работах [7; 8], где рассмотрен алгоритм оценки качества работы распределенной по территории Ижевска транспортной системы теплотрасс и реализованы методы оптимизации ее функционирования. Эти же подходы частично можно применить к моделированию и анализу дорожно-транспортной системы городской среды.

#### *Постановка задачи*

Рассмотрим дорожно-транспортную сеть, включающую в себя перекрестки и светофорное регулирование. Обозначим  $\mu_{ij}(t)$  интенсивность проходящего потока транспортных средств через  $i$ -ый перекресток с  $j$ -го направления в момент времени  $t$ . С учетом установленного на перекрестке светофорного регулирования в общем виде можно записать:

$$\mu_{ij}(t) = f(T_i(t), \tau_{i1}(t), \tau_{i2}(t), \dots, \tau_{in_i}(t)), \quad (1)$$

где  $T_i(t)$  – время цикла смены цветов светофора на  $i$ -ом перекрестке в дорожной системе, сек.;  $\tau_{ij}(t)$  – время работы зеленого сигнала светофора на  $i$ -ом перекрестке в  $j$ -ом направлении ( $j = \overline{1, n_i}$ ).

Единицы измерения введенных величин:  $[\mu_{ij}(t)] = \text{ед./сек.}$ ,  $[T_i(t)] = \text{сек.}$ ,  $[\tau_{ij}(t)] = \text{сек.}$

Выходящий поток  $\sigma_{ik}(t)$  в момент времени  $t$  определяется с учетом вероятностей поворотов:

$$\sigma_{ik}(t) = \sum_{j=1}^n (p_{ij \rightarrow ik} \cdot \mu_{ij}(t)), \quad (2)$$

где  $p_{ij \rightarrow ik}$  – вероятность поворота со стороны полосы  $ij$  в сторону полосы  $ik$ ,  $[\sigma_{ik}(t)] = \text{ед./сек.}$

Количество транспортных средств  $N_{ij}(t)$  на участке дороги между перекрестками определяется соотношением:

$$N_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \text{если } N_{ij}(t-1) + \lambda_{ij}(t) - \mu_{ij}(t) \leq 0, \\ N_{ij}(t-1) + \lambda_{ij}(t) - \mu_{ij}(t), & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

Обозначим  $\lambda_{ij}(t)$  интенсивность входящего потока транспортных средств, приходящего на  $i$ -ый перекресток с  $j$ -го направления,  $[\lambda_{ij}(t)] = \text{ед./сек.}$  Для входных потоков в дорожную систему интенсивность движения транспортных средств будем определять с учетом коэффициентов  $\beta_{ij}$ , вычисляемых по формуле:

$$\beta_{ij}(t) = \lambda_{ij}(t) / \lambda_0(t), \quad (4)$$

где  $\lambda_0(t)$  – базовая интенсивность входящего потока транспортных средств, которая учитывает динамику неравномерности потока в течение выбранного для изучения временного периода.

*Результаты расчетов на примере центральной части дорожной системы города Ижевска*

Рассмотрим работу участка дороги, расположенного в центральной части города Ижевска. Участок дороги состоит из девяти взаимосвязанных перекрестков (см. рис. 1).

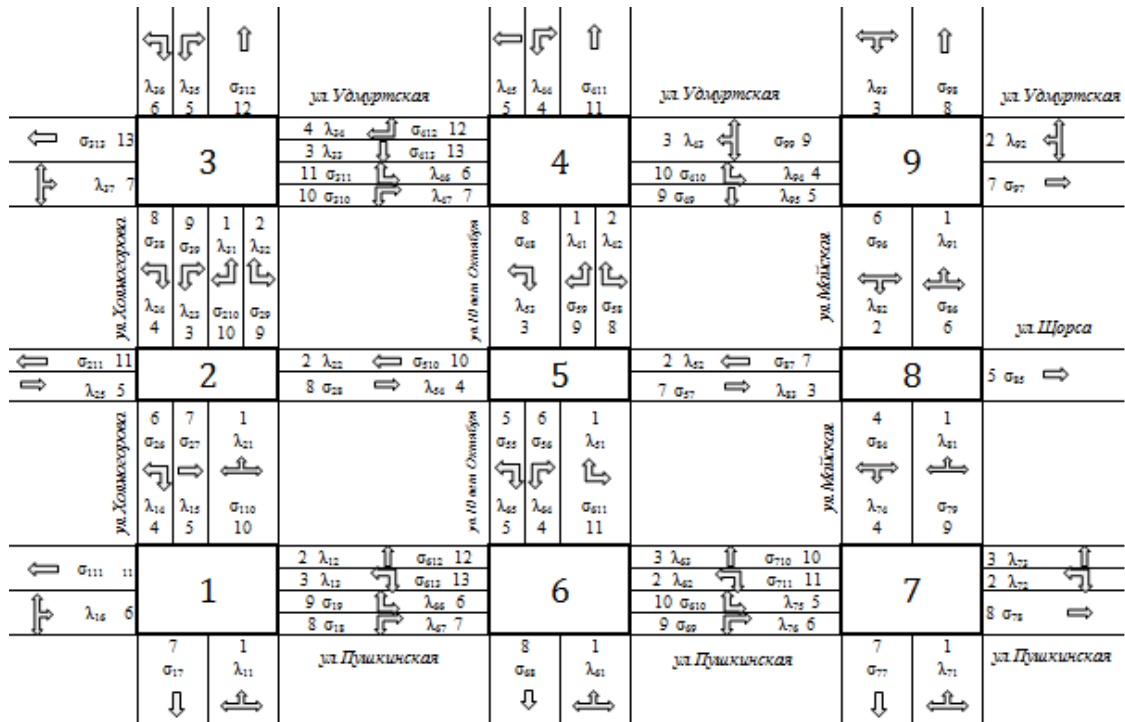


Рис. 1. Сеть перекрестков в центральной части города Ижевск

В каждом городе в определенные промежутки времени возникают очереди на дорогах. Таким образом, формируются препятствия для свободного движения транспортных средств.

С использованием математической модели (1)-(4) построим графики очередей для каждой из полос. Рассмотрим утренний период времени с  $t_n=7:00$  до  $t_k=9:00$  местного времени, поскольку именно в эти часы уменьшается пропускная способность и образуются продолжительные по времени и длине очереди из транспортных средств. Но, ближе к  $t_k=9:00$ , дорожные полосы разгружаются от накопленных потоков.

На рис. 2 представлен график базовой интенсивности  $\lambda_0(t)$  входящего потока транспортных средств в период времени с  $t_n=7:00$  до  $t_k=9:00$ . На рис. 3

приведены коэффициенты интенсивности движения транспортных средств, рассчитанные в соответствии с формулой (4).

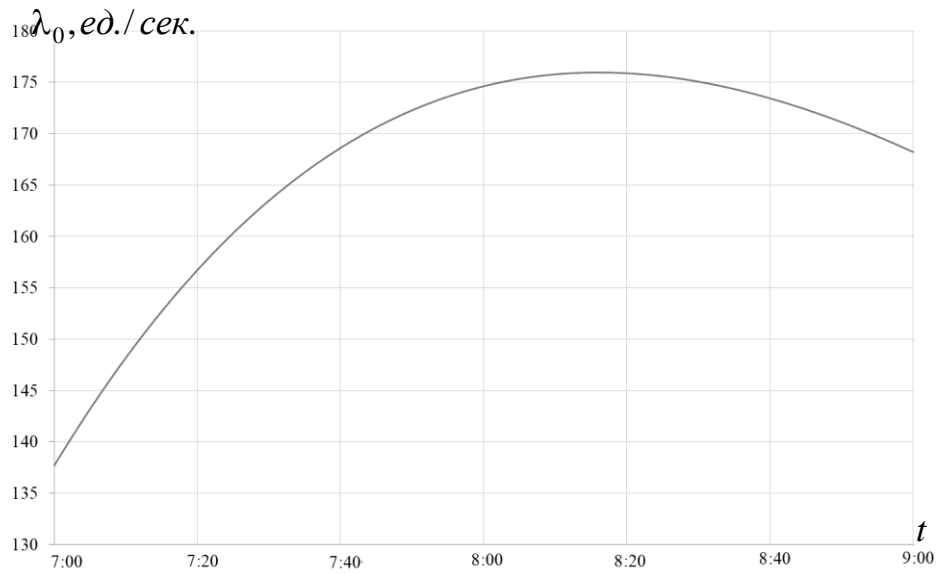


Рис. 2. Интенсивность потока транспортных средств  $\lambda_0(t)$

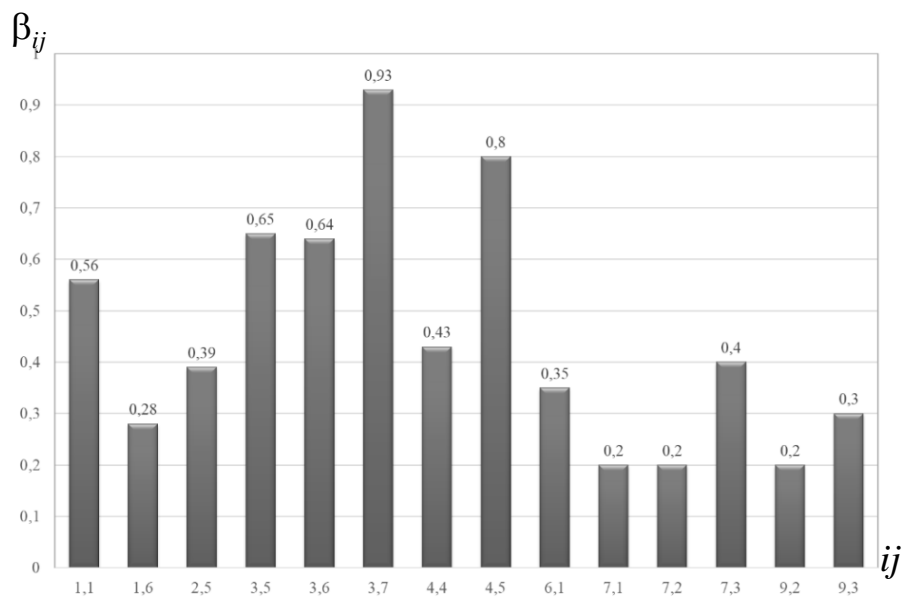


Рис. 3. Коэффициенты  $\beta_{ij}$  для входных потоков в дорожную систему

Для расчета выходящего потока транспортных средств воспользуемся формулой (2). Рассмотрим перекресток № 1, представленный на рис. 4.

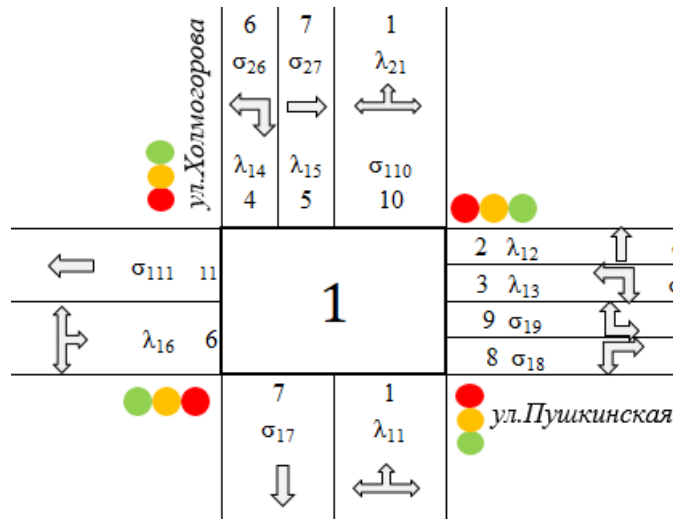


Рис. 4. Перекресток ул. Холмогорова и ул. Пушкинская

Для данного перекрестка запишем систему выходящего потока транспортных средств:

$$\begin{cases} \sigma_{1.7} = \mu_{1.6}P_{1.6 \rightarrow 1.7} + \mu_{1.4}P_{1.4 \rightarrow 1.7} + \mu_{1.3}P_{1.3 \rightarrow 1.7}, \\ \sigma_{1.8} = \mu_{1.1}P_{1.1 \rightarrow 1.8} + \mu_{1.5}P_{1.5 \rightarrow 1.8} + \mu_{1.6}P_{1.6 \rightarrow 1.8}, \\ \sigma_{1.9} = \mu_{1.1}P_{1.1 \rightarrow 1.9} + \mu_{1.5}P_{1.5 \rightarrow 1.9} + \mu_{1.6}P_{1.6 \rightarrow 1.9}, \\ \sigma_{1.10} = \mu_{1.1}P_{1.1 \rightarrow 1.10} + \mu_{1.2}P_{1.2 \rightarrow 1.10} + \mu_{1.6}P_{1.6 \rightarrow 1.10}, \end{cases} \quad (5)$$

где

$$\sum_{i=5}^{10} p_{1.1 \rightarrow 1.i} = 1, \sum_{i=5}^{10} p_{1.2 \rightarrow 1.i} = 1, \sum_{i=5}^{10} p_{1.3 \rightarrow 1.i} = 1, \sum_{i=5}^{10} p_{1.4 \rightarrow 1.i} = 1, \sum_{i=5}^{10} p_{1.5 \rightarrow 1.i} = 1, \sum_{i=5}^{10} p_{1.6 \rightarrow 1.i} = 1.$$

Рис. 5 иллюстрирует фазы работы светофоров на перекрестке (рис. 4). По оси абсцисс отложено время в сек.

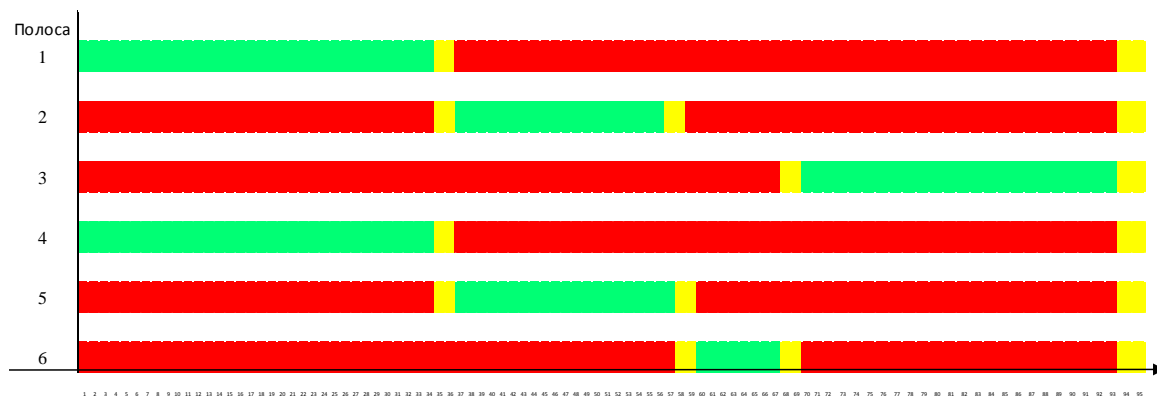


Рис. 5. Фазы работы светофоров на перекрестке ул. Холмогорова и ул. Пушкинская

На рис.6 приведен итоговый график зависимости общего числа транспортных средств в дорожной системе (рис. 4) от времени в выбранный временной интервал с  $t_n=7:00$  до  $t_k=9:00$ .

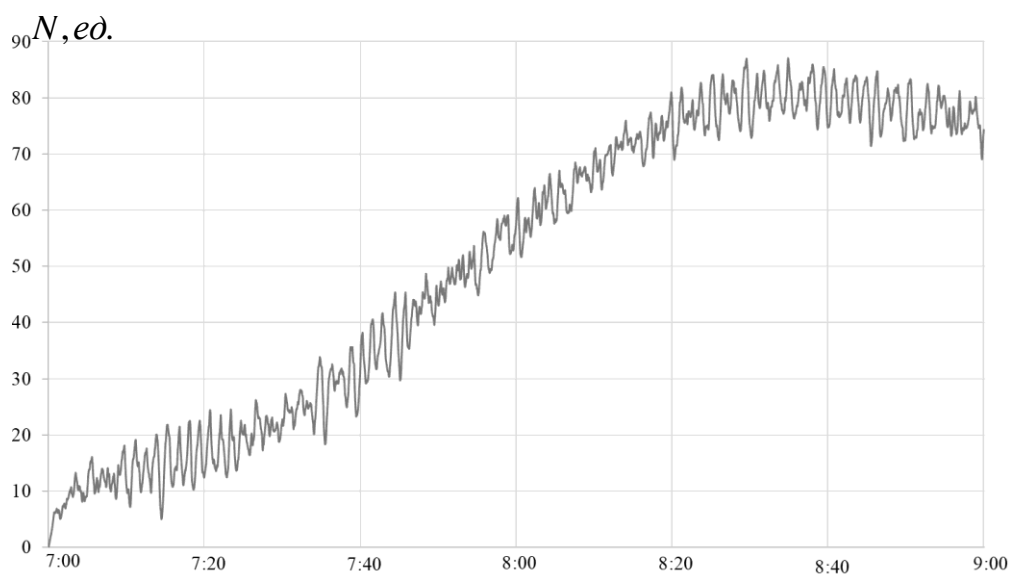


Рис. 6. Общее количество транспортных средств в дорожной системе, ед.

Таким образом, можно видеть, что для рассматриваемого примера на данном отрезке дорожно-транспортной системы в выбранный интервал времени максимальная очередь системы достигает порядка 86 транспортных средств.

### *Заключение*

Построенная имитационная модель транспортных потоков в условиях светофорного регулирования может быть использована при проведении практических расчетов для анализа эффективности функционирования городской транспортной системы. Модель позволяет рассчитывать показатели интенсивности движения транспортных средств в различные интервалы времени дорожных систем любой сложности. Для примера изучена система перекрестков центральной части города Ижевска. На основе предложенной модели оценки транспортных потоков построено распределение количества транспортных средств, находящихся в дорожной системе, от времени.

Данное исследование в дальнейшем можно использовать для оптимизации светофорного регулирования с целью устранения заторов.

### **Библиографический список:**

1. Информационный сайт Госкомстата России. Транспорт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (дата обращения 03.10.2020).
2. Румянцев Е. А., Драгунов А. Ф. Необходимость разработки оценок уровня организации дорожного движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование / Изд-во: Иркутский государственный университет путей сообщения. – 2012. – № 2 (34). – С. 227-229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17925217> (дата обращения 03.10.2020).
3. Димова И.П. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта и движения транспортных средств в зоне их влияния // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень, 2009.
4. Власов А.А. Теория транспортных потоков: монография / А.А. Власов. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 124 с.
5. Ахмадинуров М.М, Завалищин Д.С, Тимофеева Г.А. Математические модели управления транспортными потоками // Монография. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2011. – 120 с.
6. Швецов В.И., Алиев А.С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 64 с.
7. Русяк И.Г., Преснухин В.К., Кетова К.В., Королев С.А., Трушкова Е.В. Разработка концепции топливообеспечения распределенной региональной системы теплоснабжения местными возобновляемыми видами топлива // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2010. – № 5. – С. 14-20.
8. Кетова К.В., Трушкова Е.В., Кривенков Р.Ю. Применение кластерного анализа для решения задачи оптимального распределения топливно-энергетических ресурсов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. № 2 (16). – С. 207-213. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15501464> (дата обращения 23.09.2020).