# СОЗДАНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ

CREATING AN INFORMATION AND ANALYTICAL ENVIRONMENT TO MANAGE TRAFFIC FLOWS

**УДК 004.942, 519.677**

**Касаткина Екатерина Васильевна**, к.ф.-м.н., доцент, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, e.v.trushkova@gmail.com

**Кетова Каролина Вячеславовна**, д.ф.-м.н., профессор, Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, ketova_@mail.ru

**Kasatkina E.V.**, doctor of physics and mathematics, associate professor;

**Ketova K.V.**, candidate of physics and mathematics, professor;

Kalashnikov Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov

**Аннотация.** В работе представлен расчетный алгоритм для проектирования программного продукта, имитирующего дорожно-транспортную систему города. Имитационная мультиагентная модель движения потока автомобилей и расчетный алгоритм программно реализованы в виде интеллектуальной аналитической системы. Разработанный инструментарий компьютерного моделирования потоков в городской транспортной сети используется для оптимизации светофорного регулирования с целью устранения заторов в транспортных сетях.

**Summary.** The paper presents a computational algorithm for designing a software product that simulates the road transport system of the city. The simulation multi-agent

model of the traffic flow of cars and the calculation algorithm are programmatically implemented in the form of an intelligent analytical system. The developed tools for computer modeling of traffic flows in the urban transport network are used to optimize traffic light regulation in order to eliminate congestion in transport networks.

**Ключевые слова:** транспортный поток, имитационное моделирование, мультиагентная модель, информационно-аналитическая среда.

**Keywords:** traffic flow, simulation, multi-agent model, information and analytical environment.

## Введение

В последние десятилетия в нашей стране количество автомобилей неуклонно растет. По данным, представленным на официальном сайте Госкомстата России в разделе «Транспорт» [1], за период 2000-2018 годы количество автомобилей в расчете на тысячу человек на российских дорогах увеличилось более чем в два раза (см. рис. 1). В 2018 году на тысячу россиян приходилось 293 легковых автомобиля, хотя десять лет назад этот показатель составлял 220 единиц; процент семей, имеющих автомобиль, составляет 51,2 % [1,2].

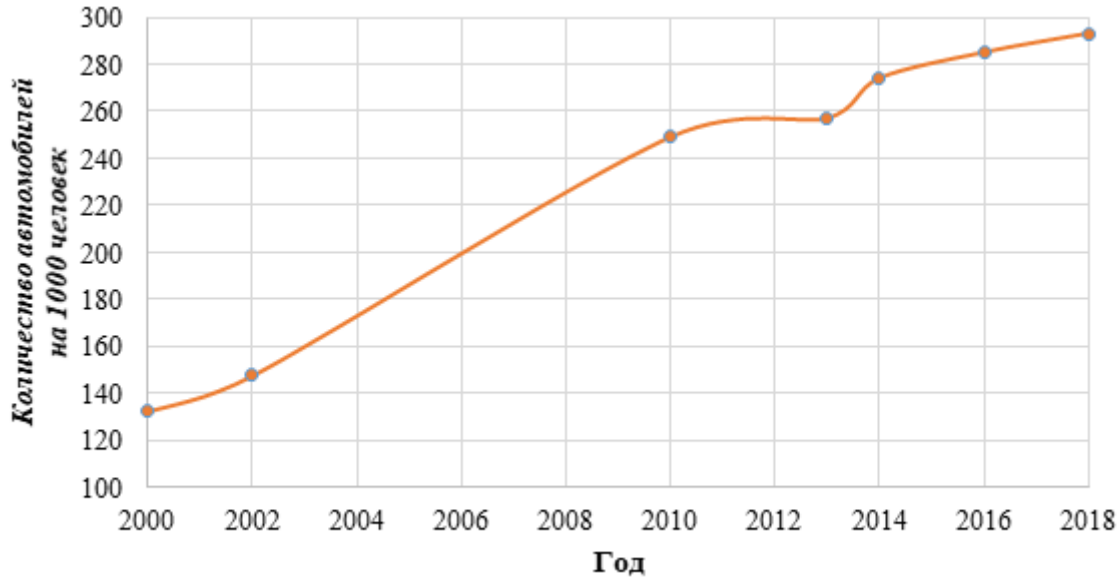



Рис. 1– Годовые показатели количества автомобилей в РФ
за период 2000-2018 годы в расчете на 1000 человек населения

В этой связи актуальной становится проблема загруженности автомобильных дорог и организации городских транспортных потоков [3-5]. Для предупреждения возникновения сложных транспортных проблем на дорогах необходимо совершенствовать методологию и математические методы, применяемые для организации транспортных потоков [6-10].

Темпы роста автомобилизации населения в разных регионах РФ коррелируют с темпами роста соответствующих социально-экономических показателей в этих регионах. Так, например, рост числа вновь выданных водительских удостоверений, а также количество проданных автомобилей за последние годы привели к увеличению автомобильного парка в Удмуртской Республике (УР), темпы роста которого в значительной степени превышают темпы строительства дорожных сетей. На рис. 2 изображены по имеющейся статистике темпы базисного прироста протяженности дорог, количества транспортных средств, стоящих на учете и количества новых водительских удостоверений по Удмуртской Республике (УР) относительно 2010 года [1].

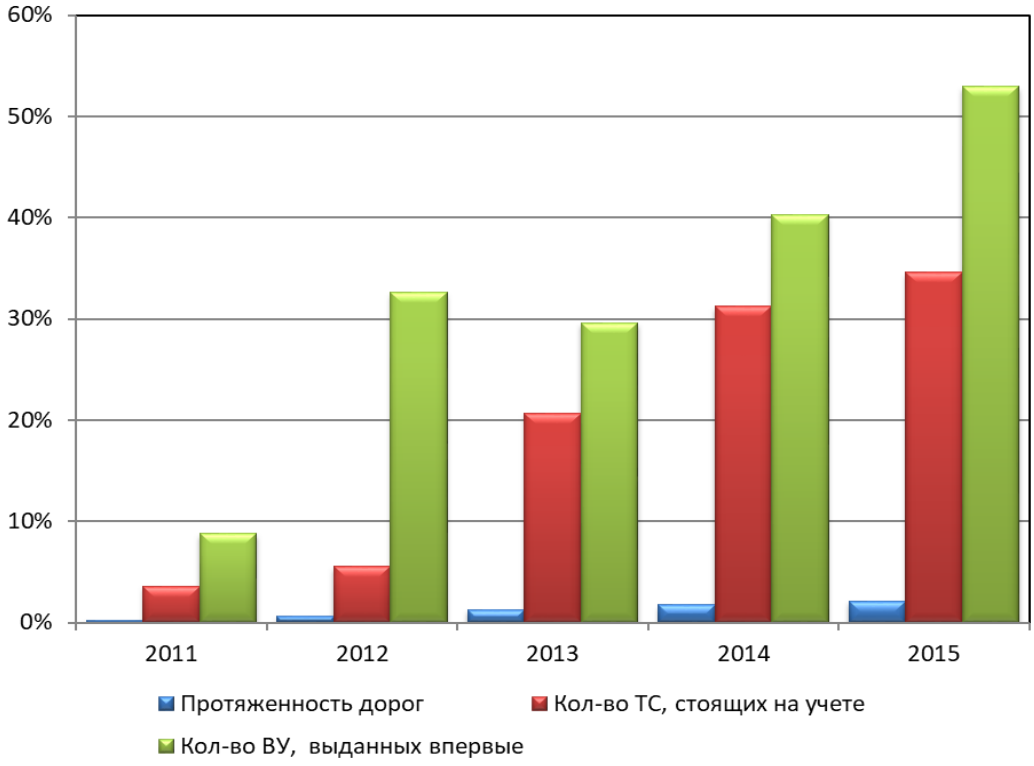



Рис. 2 – Темпы базисного прироста различных показателей инфраструктуры УР за период 2000-2018 годы

В настоящее время для устранения заторов на дорогах существует ряд способов [11], а именно: внедрение специальных инженерно-технических сооружений, строительство подземных и надземных пешеходных переходов, строительство многоуровневых развязок с полосами для торможения и разгона, уменьшение количества поворотов на дороге, реконструкция и расширение дорог, улучшение дорожного полотна, ввод интеллектуальных и автоматизированных систем управления светофорами.

Решение задачи устранения заторов на дорогах при помощи светофорного регулирования требует применения математических методов моделирования движения транспортных потоков.

Основы математического моделирования закономерностей дорожного движения были заложены еще в 1910-1912 годах русским ученым, профессором Г. Д. Дубелиром в его книгах «Планировка городов» и «Городские улицы и мостовые» [12]. Позже работы по обобщению математических исследований транспортных потоков и представления их в виде самостоятельного раздела прикладной математики продолжил американский ученый Ф. Хейт, издав в 1966 году труд «Математическая теория транспортных потоков» [13]. Дальнейшие исследования и разработки в этой области нашли отражение в работах многих зарубежных и отечественных ученых [12].

Результаты моделирования движения автотранспорта объективны и способствуют нахождению оптимального решения транспортных задач.

Так, на примере дорожной системы города Екатеринбурга в 2008 году была реализована автоматическая система управления дорожным движением (АСУДД), оценка работы которой показала, что практическая эксплуатация интеллектуальных систем на дорогах позволяет повышать пропускную способность дорог в пределах от 15 % до 50 %, уменьшать аварийность на 20 - 40 % [14].

В России ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение транспортных потоков и на разработку программного обеспечения [15]. Применяются новые подходы в области транспортных потоков, например,

используется теория систем массового обслуживания для создания математической модели регулируемого перекрестка [16]. Новый интересный подход моделирования транспортных потоков предложил В. В. Семенов: переполненный поток принимается как начальное состояние дороги, а задача моделирования – перейти от заторного состояния к свободному [17].

**Основная часть**

В данной работе исследование потоков в городской транспортной сети будем осуществлять методами компьютерного имитационного моделирования [18]. В рамках создания информационно-аналитической среды для управления транспортными потоками будем использовать один из типов имитационного моделирования – агентное моделирование [19-25], при помощи которого возможен успешный анализ сложных адаптивных систем.

Под агентом в агентном моделировании понимается элемент модели, который обладает набором свойств и функций (поведение, память, взаимосвязи), из взаимодействия агентов рождается обобщенное поведение всей системы в целом [24,25]. На сегодняшний день агентное моделирование является одним из передовых методов имитационного моделирования [21].

Успех компьютерного имитационного моделирования является следствием применения во взаимосвязи методов математического моделирования и современных информационных технологий. Компьютерное имитационное моделирование транспортных потоков будем осуществлять с использованием методологии, частично представленной авторами в работах [26-29], где рассмотрен алгоритм оценки качества функционирования распределенной по территории транспортной системы теплоснабжения и реализованы методы оптимизации ее работы. Эти же подходы можно применить к моделированию и анализу дорожно-транспортной системы городской среды.

Агентное моделирование позволяет создать информационно-аналитическую среду, с помощью которой возможно конструировать схемы дорожной сети, изменять параметры светофоров и отслеживать в реальном времени влияние этих изменений на пропускную способность на дорогах.

Рассмотрим элементы созданной авторами информационно-аналитической среды с использованием подходов агентного моделирования на примере одного из городов РФ – столицы Удмуртской Республики города Ижевска.

Ситуация на дороге зависит от многих параметров. К ним относятся и время суток, и день недели, и погодные условия. Карта города Ижевска с отображением пробок в часы пик представлена на рисунке 3.

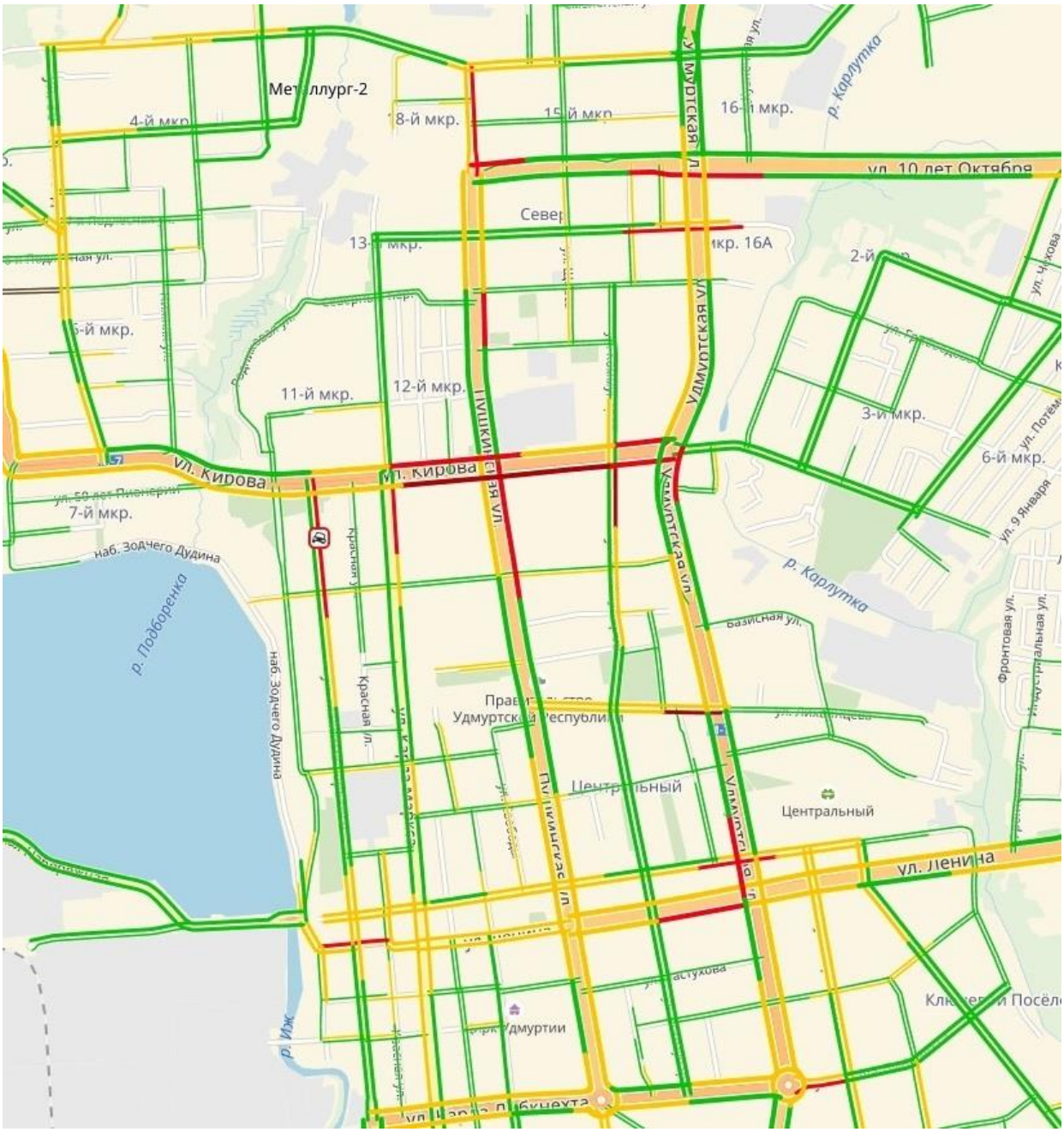





Рисунок 3 – Карта Ижевска с отображением пробок

Для решения задачи управления транспортными потоками была разработана информационно-аналитическая среда, которая состоит из четырех базовых компонент (рисунок 4).




Рисунок 4 – Структура среды моделирования автотранспортных потоков

Первый этап решения задачи – анализ входных потоков автомобилей. Под входным потоком подразумевается поток автомобилей, приезжающих к перекрестку по одной из полос. Необходимо установить закон распределения временных интервалов приезда автомобилей к перекрестку. Решение этой задачи позволит моделировать автомобильный поток, максимально приближенный к реальным условиям.

Второй шаг – построение математической модели движения, перестроения и обгона автомобилей. Здесь необходимо аналитически описать законы, согласно которым происходит движение автомобиля, а также установить правила перестроения и обгона автомобилей.

Третий шаг заключается в создании имитационной модели (компьютерной программы), которая строится на основе алгоритмов поведения автомобилей (математических формул и логических условий).

На четвертом шаге решается задача оптимизации светофорного регулирования на изолированном перекрестке.

Математическая модель движения отдельных автомобилей состоит из трех компонентов. Модель движения автомобилей, в которой скорость автомобиля задается усредненными параметрами на выбранном участке. Модель перестроения и обгона позволяет водителям самостоятельно принимать решение о перестроении в более выгодную полосу движения. Модель реализована с помощью логических выражений. Генератор входного потока автомобилей формирует временные интервалы между созданием автомобилей случайным образом по показательному распределению.

В основе модели движения лежит граф, в котором дороги представляются ребрами, а перекрестки и изгибы дорог – вершинами графа. На каждом участке дороги задается средняя скорость движения автомобилей $[V_0]$= м/с. На рисунке 5 представлена схема движения автомобиля по прямой на двумерной плоскости из точки А $(x_1, y_1)$ в точку В $(x_2, y_2)$.

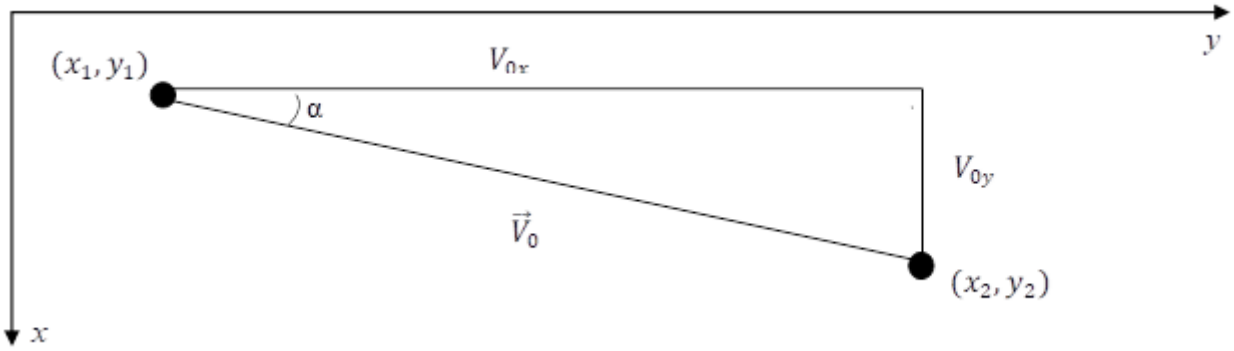



Рисунок 5 – Схема движения автомобиля по прямой на двумерной плоскости

Расстояние $S$, которое проходит автомобиль, можно найти по формуле:

$$S = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (1)$$

Интенсивность движения автомобиля по осям с постоянной скоростью $\overline{V_0} = (V_{0x}, V_{0y})$ определим по формуле:

$$V_{0x} = V_0 \cos\alpha,\ V_{0y} = V_0 \sin\alpha. \quad (2)$$

Каждый автомобиль при необходимости может менять полосу движения, при этом проверяется возможность безопасного перестроения (рисунок 6).

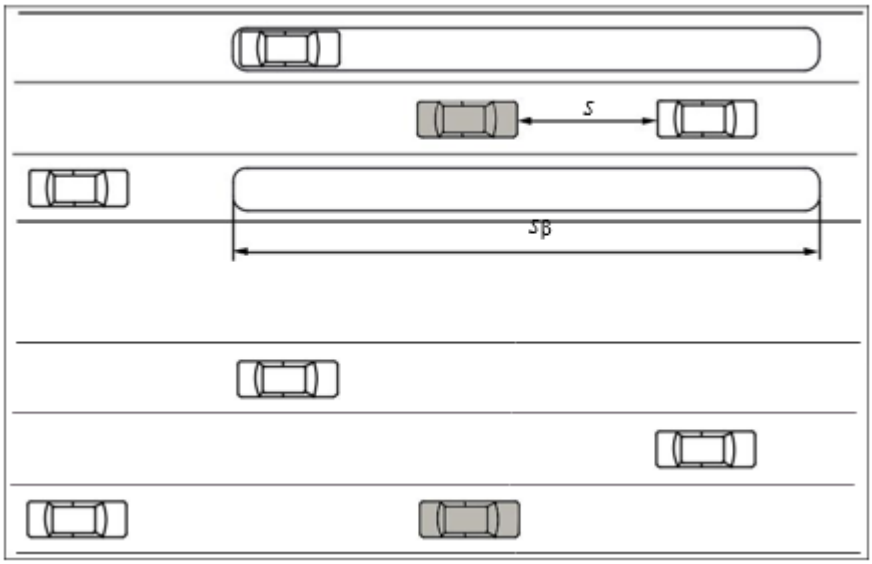



Рисунок 6 – Перестроение автомобиля в правый ряд

Как только расстояние $s$ до впереди едущего автомобиля становится меньше допустимого, а также в процессе движения по участку дороги, предпринимается попытка сменить ряд. Сначала проверяется, можно ли перестроиться в левый ряд. Если нельзя, то проверяется возможность перестроиться в правый ряд. Исследованиями ускорения и торможения в макроскопической модели можно пренебречь и считать скорость автомобилей постоянной. Параметр $s_\beta$ задает дистанцию безопасности, которая проверяется перед перестроением автомобиля.

Реальный поток автомобилей имеет распределение, близкое к показательному распределению. Поэтому в имитационной модели временные интервалы между созданием автомобилей генерируются случайным образом по показательному распределению.

Для моделирования случайного временного интервала – экспоненциально распределенной случайной величины воспользуемся методом обратной функции [30], также известным как метод инверсии.

Чтобы найти возможное значение $x_i$ непрерывной случайной величины $X$, зная ее функцию распределения $F(x)$, надо выбрать случайное число $r_i$, приравнять его функции распределения и решить относительно $x_i$ полученное уравнение, то есть найти функцию, обратную к функции распределения [30]:

$$F(x_i) = r_i \tag{3}$$

Применим данный метод для генерации случайной величины по показательному закону. Функция показательного распределения:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \end{cases}. \tag{4}$$

Рассмотрим случай $x \geq 0$ и применим случайное число $r_i$ к функции показательного распределения $F(x_i) = r_i$, получим:

$$r_i = 1 - e^{-\lambda x}. \tag{5}$$

Решим уравнение (5) относительно $x_i$:

$$x_i = \frac{-1}{\lambda} \ln(1 - r_i). \tag{6}$$

Случайное число $r_i$ заключено в интервале $(0, 1)$, следовательно, число $(1 - r_i)$ также является случайным и принадлежит интервалу $(0, 1)$. Иначе говоря, величины $R$ и $(1 - R)$ распределены одинаково. Поэтому для отыскания значений $x_i$ можно воспользоваться более простой формулой:

$$x_i = \frac{-1}{\lambda} \ln r_i, \tag{7}$$

где $r_i$ – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $(0, 1)$; $x_i$ – случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром $\lambda$.

Таким образом, с использованием формулы (7) моделируется выборочная совокупность, составленная из временных интервалов между созданием автомобилей и имеющая показательное распределение.

В программе значение параметра $r_i$ генерируется с помощью встроенного датчика случайных чисел – функции Random, которая “возвращает” непрерывную случайную величину, равномерно распределенную на отрезке $(0, 1)$.

С помощью параметра [$\lambda$]=авт./ч задается интенсивность входного потока автомобилей, приезжающих к перекрестку по одному из направлений. (рисунок 7).

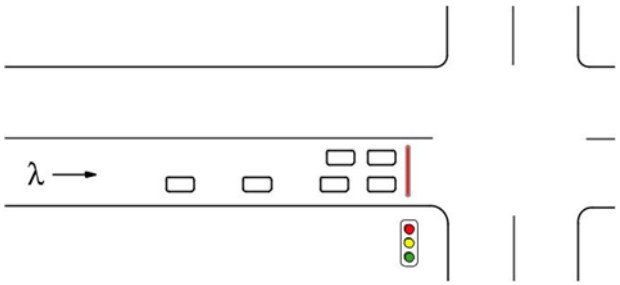



Рисунок 7 – Входной поток автомобилей на перекрестке

Простейшим (пуассоновским) называют поток событий, который обладает свойствами стационарности, отсутствия последствий и ординарности [31]. В городских условиях при плотных транспортных потоках и влиянии регулируемых пересечений транспортный поток может распределяться по закону, отличному от пуассоновского [32]. Например, рекомендуется описывать распределение скоростей движения и интервалов между автомобилями в потоках в городах с интенсивностью более 600 авт./ч на полосу нормальным распределением случайной величины [33].

В ходе выполнения работы были выполнены исследования, цель которых – проверить, является ли входной поток автомобилей на улично-дорожной сети простейшим потоком.

Для выполнения поставленной задачи были изучены транспортные потоки на двух перекрестках Ижевска [34,35]. Объектом исследования являлся временной

интервал между подъезжающими к перекрестку автомобилями. Подготовка и обработка исходных данных для математического моделирования автомобильных транспортных систем была осуществлена с применением методов математической статистики [36].

В модели учитываются сигналы светофора по отдельным направлениям движения. Подъезжая к перекрестку, движение регулируется светофором в каждом направлении, это позволяет создать более реалистичную имитацию на тех перекрестках, где светофорное регулирование разделено по секциям. При переезде через перекресток автомобиль выбирает направление движения. Выбор обуславливается полосой движения, а также вероятностными характеристиками $p_{ij}$, которые задаются для каждой полосы в текущем направлении движения. Также задаются индексы дороги, на которую будет совершен маневр. Возможные маневры автомобилей при переезде через перекресток продемонстрированы на рисунке 8.

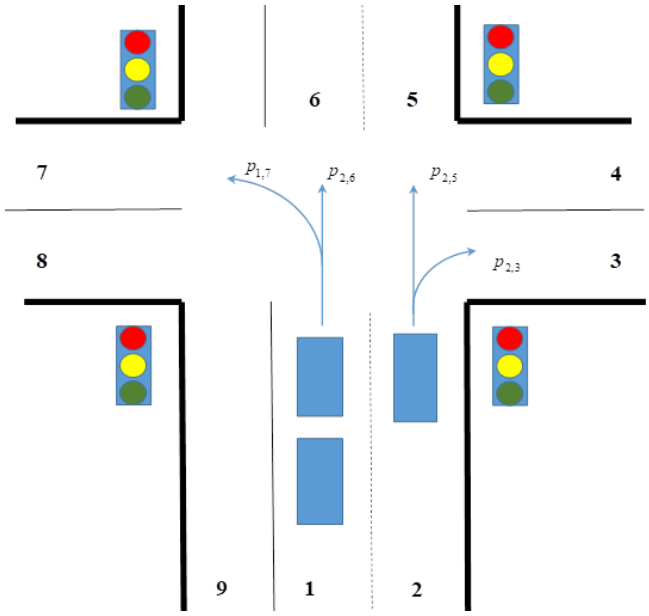



Рисунок 8 – Маневры автомобилей на перекрестке

В настоящее время существует готовые программы по визуализации имитационных моделей транспортных потоков, но не всегда их можно подстроить

под разработанную модель. Для визуализации подобной модели можно использовать растровую или векторную графику. Поддержка взаимодействия с обоими типами график реализована на языке JavaScript [37,38]. Данный язык используется как встраиваемый язык для программного доступа к объектам приложения, а также веб-сайтов для придания интерактивности. Сравнив целевое применение, а также возможности и особенности, была выбрана растровая графика в рамках решения задачи по созданию программного комплекса для имитационного моделирования.

Общий принцип моделирования: на карте выполняется построение дорог с определенным количеством полос, учитывается длина и ширина проезжей части. На перекрестках устанавливаются светофоры. В определенных местах на карте устанавливаются генераторы – источники автомобильного потока, которые имитируют места рождения транспортного потока

Автомобили движутся с постоянной скоростью. Через равные промежутки времени каждое автотранспортное средство перемещается в заданном направлении, если его движению не препятствует другой автомобиль или стоп-линия. В модели учитываются сигналы светофора по отдельным направлениям движения. Подъезжая к перекрестку, движение регулируется светофором в каждом направлении, это позволяет создать более реалистичную имитацию на тех перекрестках, где светофорное регулирование разделено по секциям.

**Заключение**

Разработан расчетный алгоритм для проектирования программного продукта, имитирующего транспортную систему, с учетом движения автомобилей по полосам и их поведения на перекрестках.

Имитационная мультиагентная модель и расчетный алгоритм программно реализованы в виде интеллектуальной аналитической системы, которая включает также базу данных, спроектированную в среде СУБД MS SQL, и модуль визуализации.

Разработанный инструментарий компьютерного моделирования потоков в городской транспортной сети планируется использовать для оптимизации светофорного регулирования с целью устранения заторов в транспортных сетях.

**Список использованных источников**


1. Информационный сайт Госкомстата России. Транспорт. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1 (дата обращения 23.12.2020).
2. Князева И.С. Статистическое изучение процесса автомобилизации населения РФ // Международный научный журнал «Символ науки». 2017. № 04-1. С. 109-111.
3. Кузьмич С.И., Федина Т.О. Транспортные проблемы современных городов и моделирование загрузки улично-дорожной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2008. № 3. С. 159-166.
4. Касаткина Е.В. Статистическое исследование дорожно-транспортной обстановки в Удмуртской Республике // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 1. С. 53-59.
5. Анохин Б.Б., Чванов В.В. Основные тенденции автомобилизации населения и их учет в программах развития автомобильных дорог // Транспорт Российской Федерации. 2007. № 9. С. 42-46.
6. 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.
7. Агуреев И.Е., Пышный В.А., Швецов В.И. Моделирование загрузки улично-дорожной сети г. Тулы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2013. Вып. 6. Ч. 2. С. 127-139. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-15
8. Власов А.А. Теория транспортных потоков: монография / А.А. Власов. Пенза: ПГУАС. 2014. 124 с.
9. Елинек Й., Высока Я. О подходах в моделировании транспортной динамики // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 121-129.

10. Ахмадинуров М.М, Завалищин Д.С, Тимофеева Г.А. Математические модели управления транспортными потоками // Монография. Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. 2011. 120 с.
11. Андреев К.П., Кулик С.Н., Терентьев В.В. Мероприятия по улучшению улично-дорожной сети // Новая наука: Проблемы и перспективы. 2016. № 115-2. С. 156-159.
12. Клинковштейн Г. И., Афанасьев М. Б. Организация дорожного движения: учеб. для вузов. 5-е изд. // М.: Транспорт. 2001. 247 с.
13. Хейт Ф. Математическая теория транспортных потоков // М.: Мир. 1966. 248 с.
14. Коновалов А. АСУДД идет // Эксперт-Урал. № 15. 2008. С. 20-22.
15. Бекмагамбетов М.М., Кочетков А.В. Анализ современных программных средств транспортного моделирования // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 6 (77). С. 25-34.
16. Тимофеева Г. А., Завалищин Д. С. Математическая модель регулируемого перекрестка // Транспорт Урала. 2008. № 2 (17). С. 92-97.
17. Семенов В. В. Математическое моделирование транспортных потоков мегаполиса // Препринты института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, М. 2004. № 34. С. 1-38.
18. Строгалев В.П., Толкачева И.О. Имитационное моделирование. // М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 280 с.
19. Остроух А.В., Николаев А.Б Интеллектуальные системы в науке и производстве // Saarbrucken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 312 p. DOI: 978-3-659-98006-0.
20. Macal C., North M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation // Journal of Simulation. 2010. Vol. 4. P. 151-162.
21. Лебедюк Э.А. Агентное моделирование: состояние и перспективы // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2017. № 6 (96). С. 155-162.
22. Мелихова О.А., Вепринцева О.В., Чумичев В.С. и др. Понятие агента в

системах искусственного интеллекта // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 44-51.

23. Galan J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008. Vol. 12. № 1.
24. Тарасов В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 5-63.
25. Ивашкин Ю.А. Мультиагентное имитационное моделирование больших систем: учеб. пособие / Ю. А. Ивашкин. М.: МГУПБ. 2008. 230 с.
26. 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.
27. 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.
28. Кетова К.В., Трушкова Е.В. Решение логистической задачи топливоснабжения распределенной региональной системы теплоснабжения // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4. № 2. С. 451-470.
29. Русяк И.Г., Кетова К.В., Королев С.А., Трушкова Е.В. Логистика топливоснабжения региона возобновляемыми видами топлива, получаемыми из древесного сырья. На примере Удмуртской Республики / Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ижевский государственный технический университет». Ижевск, 2011.
30. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика // Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа. 2003. 479 с.
31. Вентцель Е. С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей.

М.: Радио и связь. 1972. 416 с.

32. Мартяхин Д.С. Расчет пропускной способности городских транспортных развязок // Сб. научн. тр. 8-й Международн. научн.-техн. конф. по безопасности дорожного движения. СПб: Изд-во СПбГАСУ. 2008. С. 234-238.
33. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. // М.: Транспорт. 1972. 424 с.
34. Касаткина Е.В. Моделирование транспортных потоков на примере дорожной системы одного из районов города Ижевска // E-Scio. 2020. № 10 (49). С. 86-93.
35. Касаткина Е.В. Разработка и тестирование генетического алгоритма для решения задачи маршрутизации // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 32-43.
36. Агуреев И.Е., Митюгин В.А., Пышный В.А. Подготовка и обработка исходных данных для математического моделирования автомобильных транспортных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 6. С. 119-127.
37. Флэнаган Д. JavaScript // Изд-во Вильямс. 2019. 320 с.
38. Браун Э. Learning JavaScript: JavaScript Essentials for Modern Application Development // Изд-во Альфа-книга. 2017. 368 с.

**List of sources used**

1. Information site of the state statistics Committee of Russia. Transport. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1 (date accessed 23.12.2020).
2. Knyazeva I. S. Statistical study of the process of motorization of the population of the Russian Federation // International scientific journal «Symbol of science». 2017. № 04-1. Pp. 109-111.
3. Kuzmich S. I., Fedina T. O. Transport problems of modern cities and modeling of loading of the road network // Proceedings of the Tula state University. Technical Sciences. 2008. № 3. Pp. 159-166.

4. Kasatkina E. V. statisticheskoe Issledovanie dorozhno-transportnoy situatsii V Udmurt Republic // Vestnik IzhGTU named after M. T. Kalashnikov. 2017. T. 20. № 1. Pp. 53-59.
5. Anokhin B. B., Chvanov V. V. The Main trends of motorization of the population and their account in the programs of development of highways. // Transport of the Russian Federation. 2007. № 9. Pp. 42-46.
6. Rumyantsev E. A., Dragunov A. F. the Need to develop estimates of the level of road traffic organization // Modern technologies. System analysis. Modeling / Publishing house: Irkutsk state University of railway engineering. 2012. № 2 (34). Pp. 227-229.
7. Agureev I. E., Pyshny V. A., Shvetsov V. I. Modeling of loading of the street and road network of Tula // News Of Tulsu. Technical sciences. 2013. Issue 6. Part. 2. Pp. 127-139. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-15
8. Vlasov A. A. Theory of transport flows: monograph / A. A. Vlasov. Penza: PGAS/ 2014. 124 p. 2014. 124 p.
9. Jelinek J., High Ya. On approaches to the modeling of traffic dynamics // Bulletin of AGTU. Series: Management, computer engineering and computer science. 2014. № 1. Pp. 121-129.
10. Akhmadinurov M. M., Zavalishchin D. S., Timofeeva G. A. Mathematical models of traffic flow control. Ekaterinburg: publishing house of USURT. 2011. 120 p.
11. Andreev K. P., Kulik S. N., Terentyev V. V. Measures to improve the street and road network / / Novaya Nauka: Problemy I perspektivy. 2016. № 115-2. Pp. 156-159.
12. Klinkovshtein G. I., Afanasyev M. B. Organization of road traffic: textbook. for higher education institutions. 5th ed. / / Moscow: Transport. 2001. 247 p.
13. Haight F. Mathematical theory of transport flows / / Moscow: Mir. 1966. 248 p.
14. Konovalov A. of ATMs is // Expert-Ural. № 15. 2008. Pp. 20-22.
15. Bekmagambetov M. M., Kochetkov A.V. Analysis of modern software tools for transport modeling / / Journal of automotive engineers. 2012. № 6 (77). Pp. 25-34.
16. Timofeeva G.A., Zavalishchin D.S. Mathematical model of a regulated intersection

// Transport Of The Urals. 2008. № 2 (17). Pp. 92-97.

17. Semenov V.V. Mathematical modeling of transport flows of megapolis / / preprints of the Keldysh Institute of applied mathematics of the Russian Academy of Sciences, Moscow. 2004. № 34. Pp. 1-38.
18. Strogalev V. P., Tolkacheva I. O. Simulation modeling. // Moscow: Bauman Moscow state technical University. 2008. 280 p.
19. Ostroukh A.V., Nikolaev A. B. Intellectual systems in science and production // Saarbrucken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 312 p. DOI: 978-3-659-98006-0.
20. Macal C., North M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation // Journal of Simulation. 2010. Vol. 4. Pp. 151-162.
21. Lebedyuk E. A. Agent modeling: state and prospects // Bulletin of the Plekhanov Russian University of Economics. 2017. № 6 (96). Pp. 155-162.
22. Melikhova O. A., Veprintseva O. V., Chumichev V. S. et al. The concept of an agent in artificial intelligence systems // Technical Sciences - from theory to practice. 2015. № 53. Pp. 44-51.
23. Galan J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008. Vol. 12. № 1.
24. Tarasov V. B. Agents, multi-agent systems, virtual communities: strategic direction in Informatics and artificial intelligence / / News of artificial intelligence. 1998. № 2. Pp. 5-63.
25. Ivashkin Yu. a. multi-Agent simulation of large systems: textbook. a manual / Y. A. Ivashkin. M.: MGUPB. 2008. 230 p.
26. Rusyak I.G., Presnukhin V.K., Ketova K.V., Korolev S.A., Trushkova E.V. Development of the concept of fuel supply for a distributed regional heat supply system with local renewable fuels // Energy security and energy saving. 2010. № 5. Pp. 14-20.
27. Ketova K.V., Trushkova E.V., Krivenkov R.Yu. Application of cluster analysis for solving the problem of optimal distribution of fuel and energy resources // Intelligent systems in production. 2010. № 2 (16). Pp. 207-213.

28. Ketova K. V., Trushkova E. V. Solution of the logistic problem of fuel supply for a distributed regional heat supply system. 2012. Vol. 4. № 2. Pp. 451-470.
29. Rusyak I.G., Ketova K.V., Korolev S.A., Trushkova E.V. logistics of fuel supply to the region with renewable fuels obtained from wood raw materials. On the example of the Udmurt Republic / Ministry of education and science of the Russian Federation, Federal state budgetary educational institution of higher professional education «Izhevsk state technical University». Izhevsk, 2011.
30. Gmurman V. E. Probability theory and mathematical statistics // Textbook for universities. Moscow: Higher school. 2003. 479 p.
31. Wentzel E.S., Ovcharov L.A. Applied problems of probability theory. 1972. 416 p.
32. Martyakhin D. S. Calculation of the capacity of urban transport interchanges / / SB. nauchn. Tr. 8-y mezhdunarodn. nauchn. tehn. Conf. on road safety. St. Petersburg: Spbgasu publishing House. 2008. Pp. 234-238.
33. Drew D. The Theory of traffic flows and management. // M.: Transport. 1972. 424 p.
34. Kasatkina E.V. Modeling of transport flows on the example of the road system of one of the districts of the city of Izhevsk / / E-Scio. 2020. № 10 (49). Pp. 86-93.
35. Kasatkina E.V. Development and testing of a genetic algorithm for solving the routing problem // Applied Computer Science. 2018. Vol. 13. № 5 (77). Pp. 32-43.
36. Agureev I. E., Mityugin V. A., Pyshny V. A. Preparation and processing of initial data for mathematical modeling of automobile transport systems // News Of TulSU. Technical sciences. 2014. Issue 6. Pp. 119-127.
37. Flanagan D. JavaScript // Williams publishing house. 2019. 320 p.
38. Brown E. Learning JavaScript: JavaScript Essentials for Modern Application Development // Alpha-book publishing house. 2017. 368 p.