

УДК 004.942, 519.677

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-1-89-99

Компьютерное моделирование потоков в городской транспортной сети

Е. В. Касаткина, кандидат физико-математических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. В. Кетова, доктор физико-математических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В работе представлен подход к моделированию транспортных потоков в условиях светофорного регулирования. Разработана компьютерная имитационная мультиагентная модель транспортных потоков, которая включает три основных агента: автомобиль, светофор, генератор. Разработан расчетный имитационный алгоритм движения автомобилей по дорожным полосам и имитационный алгоритм их поведения на перекрестках. Компьютерная мультиагентная модель и имитационный расчетный алгоритм поведения автомобилей в транспортной сети реализованы в виде интеллектуальной аналитической системы, которая также включает в себя базу данных по характеристикам движения автомобилей, спроектированную в среде СУБД MS SQL, и модуль визуализации всех процессов.

Компонентами имитационной модели транспортных потоков являются система координат (карта), сами динамические объекты (автомобиль, светофор, генератор входного потока автомобилей), счетчик временных интервалов и алгоритм движения автомобилей. В процессе моделирования транспортных потоков в системе фиксируются необходимые выходные параметры модели.

На примере одного из дорожных участков города Ижевска продемонстрированы возможности реализованной модели. Разработанная компьютерная имитационная мультиагентная модель позволяет рассчитывать показатели средней длины очереди транспортных средств в любое время суток с учетом интенсивности входных транспортных потоков.

Ключевые слова: компьютерное имитационное моделирование, мультиагентная модель, транспортный поток.

Введение

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

В настоящее время проблема загруженности автомобильных дорог для многих крупных городов является проблемой, требующей немедленного решения [1, 2]. Так, например, за последние пятнадцать лет в России более чем в два раза увеличилось количество автомобилей на тысячу человек. Это можно проследить по официальным статистическим данным, представленным на сайте Госкомстата России в разделе «Транспорт» [3]. Темп роста числа личных автомобилей граждан в современных городах опережает темп развития дорожной системы. Для предупреждения возникновения сложных транспортных проблем на дорогах необходимо совершенствовать методологию и математические методы, применяемые для организации транспортных потоков [4, 5].

Существуют методы [6–9], 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. Также эффективность функционирования городской транспортной системы во многом определяется режимами светофорного регулирования на перекрестках.

В данной работе исследование потоков в городской транспортной сети будем осуществлять методами компьютерного имитационного моделирования [10]. В настоящее время методы компьютерного моделирования прочно вошли в практику решения широкого круга теоретических проблем и прикладных технических задач в различных сферах практической деятельности [11]. Компьютерное моделирование становится сегодня обязательным этапом в принятии ответственных решений во всех областях деятельности человека в связи с усложнением систем, в которых человек должен действовать и которыми он должен управлять.

Компьютерное моделирование называют имитационным, поскольку имитационная мо-

дель объекта и (или) процесса, как правило, является компьютерной программой, которая позволяет получать подробную статистику о различных аспектах функционирования системы в зависимости от входных данных путем постановки над ней имитационных экспериментов. Сущность компьютерного имитационного моделирования и состоит в построении модели, которая представляет собой некоторый программный комплекс, алгоритмически описывающий поведение объекта или развитие процесса. Целью компьютерного моделирования является принятие обоснованных, целесообразных управленческих решений.

В данной работе используется один из типов имитационного моделирования – агентное моделирование [12, 13]. Агентное моделирование позволяет исследовать поведение децентрализованных агентов и то, как это поведение определяет движение всей системы в целом. 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 [14]. Агентное моделирование является инструментом, при помощи которого возможно успешное моделирование сложных адаптивных систем.

Данная работа носит программно-исследовательский характер. При этом целью работы является применение принципов агентного моделирования для расчета транспортных потоков в городской дорожной системе на примере одного из городов.

Агентное моделирование является относительно новым методом. Оно зародилось в 1990-х годах в стенах Университета Карнеги-Меллон и получило широкое практическое распространение только после 2000 года. На сегодняшний день это, пожалуй, наиболее передовой метод имитационного моделирования, который используется учеными и исследователями в области управления в различных отраслях, позволяющий моделировать поведение объектов большой сложности [15–17].

Агентное моделирование использует два основных типа построения моделей: программный код (примером может служить программа NetLogo [18, 19]) и карту состояний («стейт-чарт») с переходами между ними (примером использования такого подхода служит программа AnyLogic [20–22]).

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 [23–26], 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.

Компьютерное имитационное моделирование позволяет создать программную среду, с помощью которой возможно конструировать схемы дорожной сети, изменять параметры светофоров и отслеживать в реальном времени влияние этих изменений на пропускную способность транспортной сети. Виртуальная среда позволяет в короткие сроки проверять эффективность проводимых или проведенных мероприятий, направленных на улучшение функционирования как всей транспортной сети, так и ее отдельных участков.

Мультиагентное моделирование транспортных потоков

Авторами была построена компьютерная имитационная модель участка транспортной сети города. Для описания параметров, свойств и физических законов движения автомобилей используются методы мультиагентного моделирования.

В мультиагентной системе агенты имеют несколько важных характеристик: автономность, ограниченность представления, децентрализацию.

Цель применения мультиагентных моделей в автотранспортных задачах – получение представления об общем поведении системы автотранспортной сети исходя из свойств и законов движения отдельно взятых автомобилей, а также их частном поведении и взаимодействии между собой в системе. Во время моделирования движения транспортных потоков в системе фиксируются все необходимые выходные параметры модели.

Разработанная авторами модель участка транспортной сети города по уровню детализации является микроскопической, время дискретное, пространство непрерывное. Изменения системы вычисляются с заданной периодичностью во времени, что обеспечивает имитацию непрерывного процесса.

Компоненты имитационной модели транспортных потоков: 1) система координат (карта);

2) динамические объекты (автомобиль, светофор, генератор входного потока автомобилей); 3) счетчик временных интервалов; 4) алгоритм движения автомобилей.

Построение дорожной сети и имитация движения автомобилей выполняются в двумерной плоскости – на карте. Дорожная сеть – это взаимосвязанные дороги с установленными на них светофорами и местами генерации автомобилей (рис. 1).

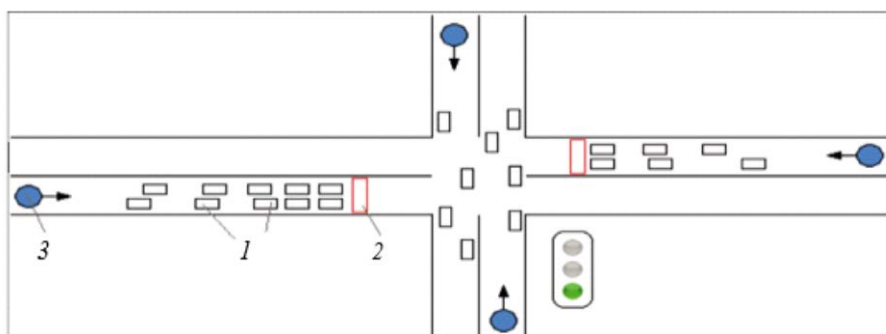


Рис. 1. Модель участка дороги: 1 – автомобили, 2 – стоп-линия, 3 – генератор

На программном уровне карта представляет собой двумерную плоскость. Точка на карте – координаты плоскости, числа (x, y) указывают на конкретную точку.

Разрешение карты характеризует, насколько детальным является изображение объектов на карте. Данные о разрешении карты хранятся в формате *dpm*. Более высокое разрешение означает более высокий уровень детализации. Такое свойство позволяет моделировать движение различных по габаритам автотранспортных средств: легковых и грузовых автомобилей, автобусов, мотоциклов.

Задание свойств и функций агентов компьютерной модели транспортной сети

В рассматриваемой задаче агентами являются автомобили, светофоры и генераторы. Используются реактивные агенты с простым поведением – агенты, которые действуют только на основе текущих знаний об окружении; их агентская функция основана на схеме «условие – действие». Каждый из перечисленных агентов на уровне языка программирования представляет собой отдельный класс с характерными для него свойствами и методами.

Автомобили – это мобильные агенты, способные передвигаться по карте, совершать перестроение между полосами движения. Эти агенты обладают свойствами, присущими настоящему автомобилю, и свойствами, необходимыми для полноценного функционирования модели:

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, например, у магазинов, предприятий, местах учебы и т. д.

- идентификатор (уникальный номер автомобиля);
- геометрическая координата положения верхней левой точки по оси абсцисс, X ;
- геометрическая координата положения верхней левой точки по оси ординат, Y ;
- точка исчезновения автомобиля (да/нет);
- состояние автомобиля (остановка или движение);
- средняя скорость автомобиля;
- номер полосы;
- идентификаторы точек, по которым определяется, откуда и куда будет выполнено перемещение автомобиля (из точки А в точку Б);
- направление движения из точки А в точку Б (прямо, налево, направо, назад);
- интенсивность движения по осям (по оси X и по оси Y).

Функции агента «автомобиль»:

- создание нового автомобиля;
- движение автомобиля (основная функция, которая вызывает функции для проверки, движения вперед, перестроения);
- проверка возможности движения вперед, определение дистанции до препятствия;
- выполнение движения: из точки А в точку Б с учетом средней скорости;
- выполнение перестроения автомобиля: сначала проверяется возможность перестроения в левый ряд, если нельзя, то в правый;
- выполнение отключения автомобиля, если он выходит за рамки карты.

Светофоры – это статические агенты, предназначенные для регулирования движения других агентов (автомобилей); светофор либо разрешает движение, либо запрещает его.

Свойства светофоров:

- идентификатор светофора (уникальный номер объекта);
- идентификатор дороги, на которую распространяется действие светофора;
- время работы красного сигнала, мс по направлениям;
- время работы зеленого сигнала, мс по направлениям;
- время работы желтого сигнала, мс по направлениям;
- время следующей фазы светофора (когда нужно сменить один сигнал на другой), такт;
- текущая фаза: 1 – зеленый, 2 – желтый, 3 – красный;
- идентификатор точки, в которой располагается светофор.

Функции агента «Светофор»:

- создание нового светофора;
- переключение фаз светофора в нужные моменты времени;
- смена стоп-линий.

Генераторы – статические агенты, которые выполняют функцию создания новых автомобилей. Генераторов может быть неограниченное количество, каждый из которых с заданной интенсивностью и в определенном месте «создает» автомобили. Применяется оптимизация памяти – когда автомобиль достигает места

назначения, он не удаляется из памяти, а лишь скрывается с карты.

Свойства генераторов:

- идентификатор генератора;
- интенсивность создания автомобилей, авт./ч;
- заданная скорость создаваемых автомобилей, м/с;
- идентификатор дороги, на которой располагается генератор;
- время следующей генерации;
- время следующей фазы светофора, такт.

Функции агента «Генератор»:

- определение времени следующей генерации автомобиля по показательному закону распределения;
- создание автомобиля с необходимыми параметрами в указанном месте;
- проверка возможности создания автомобиля в указанном месте в заданное время, то есть не занято ли место другим автомобилем.

Помимо стандартных агентов в базу данных введены таблицы: точки, дороги, характеристики дорог, характеристики светофоров.

Формирование счетчика временных интервалов

Счетчик временных интервалов – это раздел программы, выполняющий функцию отсчета внутренних временных интервалов. Счетчик выполняет точно такую же функцию, что и маятник в механических часах или кварцевый генератор в электронных часах. Программа выполняет комплекс ключевых действий (таблица), необходимых для работы имитационной модели.

Ключевые действия, необходимые для работы имитационной модели

Движение автомобилей	Всем автомобилям дается команда «Движение». Каждый автомобиль независимо от других выполняет движение со своей скоростью и ускорением или останавливается
Создание новых автомобилей	Каждому генератору задается значение внутреннего времени (количество тактов). При необходимости генератор создает новый автомобиль (агент) и вычисляет время следующей генерации автомобиля (агента) согласно показательному закону
Работа светофора	Каждому светофору передается значение внутреннего времени. При необходимости переключает сигнал светофоров (зеленый, желтый, красный) и вычисляет время следующей смены фазы
Фиксирование статистических данных	Сбор, обработка и сохранение параметров всех автомобилей

Счетчик в замкнутом цикле либо выполняет ключевые действия, либо совершает паузу, равную длине такта. Длина такта – это промежуток времени между последовательными ключевыми действиями работы программы.

Все процедуры и функции в программе опираются на то, что один такт внутри программы равен 0,1 с реального времени. Другими словами, если необходимо смоделировать движение реальных автомобилей за 1 с, то

счетчик должен выполнить 10 тактов. Длина такта – очень важный параметр счетчика. Изменяя значения длины такта, можно изменять скорость моделирования, например, если длину такта сократить в 10 раз, установив равной 0,01 с, то скорость моделирования увеличится в 10 раз.

Использование счетчика временных интервалов позволяет достигать необходимой точности вычислений, ускорять вычисления за счет сокращения длины такта.

Построение алгоритма движения автомобилей компьютерной модели транспортной сети

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. Движение каждого автомобиля выполняется согласно следующему порядку за один такт моделирования (рис. 2):

- 1 – свободное движение вперед,
- 2 – объезд препятствия слева,
- 3 – объезд препятствия справа,
- 4 – остановка.

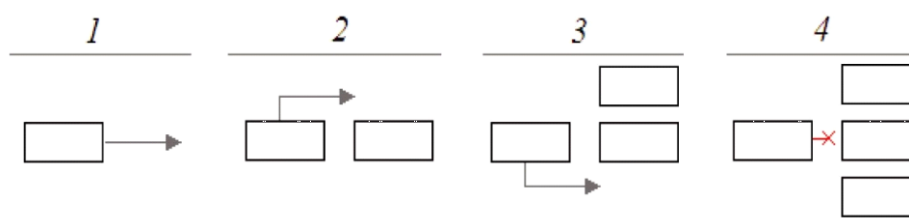


Рис. 2. Правила перестроения автомобилей за один такт

В модели учитываются сигналы светофора по отдельным направлениям движения (рис. 3). Подъезжая к перекрестку, движение регулируется светофором в каждом направлении, это

позволяет создать более реалистичную имитацию на тех перекрестках, где светофорное регулирование разделено по секциям.

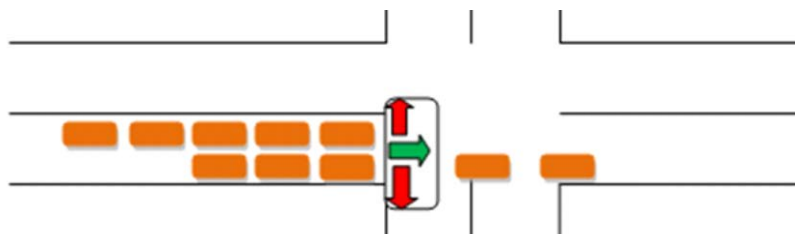


Рис. 3. Режимы работы светофора

При переезде через перекресток автомобиль выбирает направление движения. Выбор обусловливается полосой движения, а также вероятностными характеристиками $p_{i,j}$, которые задаются для каждой полосы (i) в текущем направлении движения, а также задаются индексы дорог (j), на которые будут совершены маневры. Возможные маневры автомобилей при переезде через перекресток продемонстрированы на рис. 4.

В настоящее время существуют готовые программы по визуализации имитационных моделей транспортных потоков, но не всегда их можно подстроить под разработанную модель. Для визуализации подобной модели мож-

но использовать растровую или векторную графику. Поддержка взаимодействия с обоими типами график реализована на языке JavaScript [27, 28]. 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.

Для построения имитационной модели на основе мультиагентного моделирования спроектирована базы данных, структура которой представлена на рис. 5.

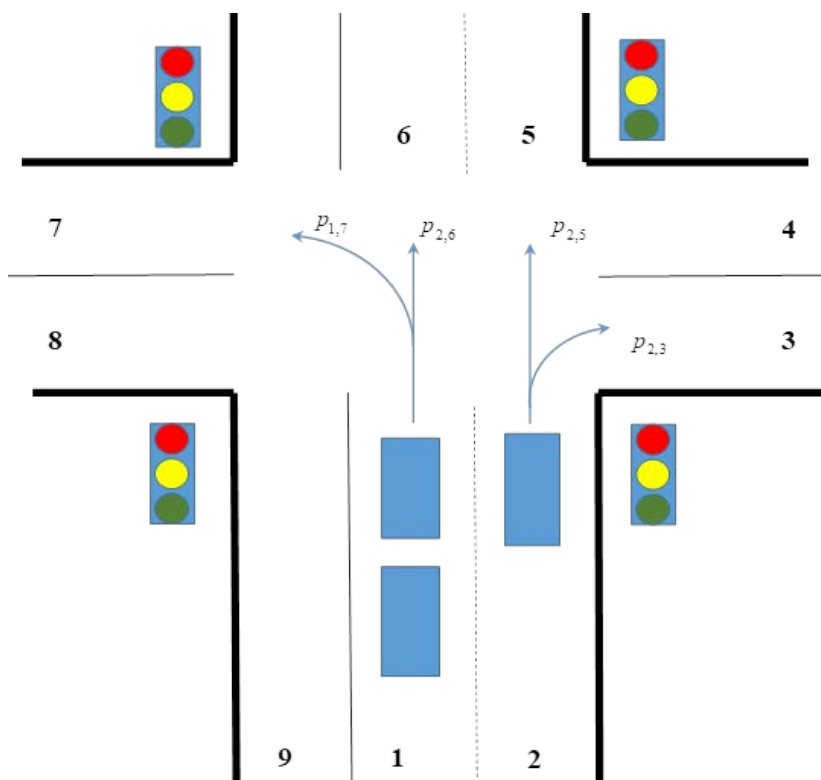


Рис. 4. Маневры автомобилей на перекрестке

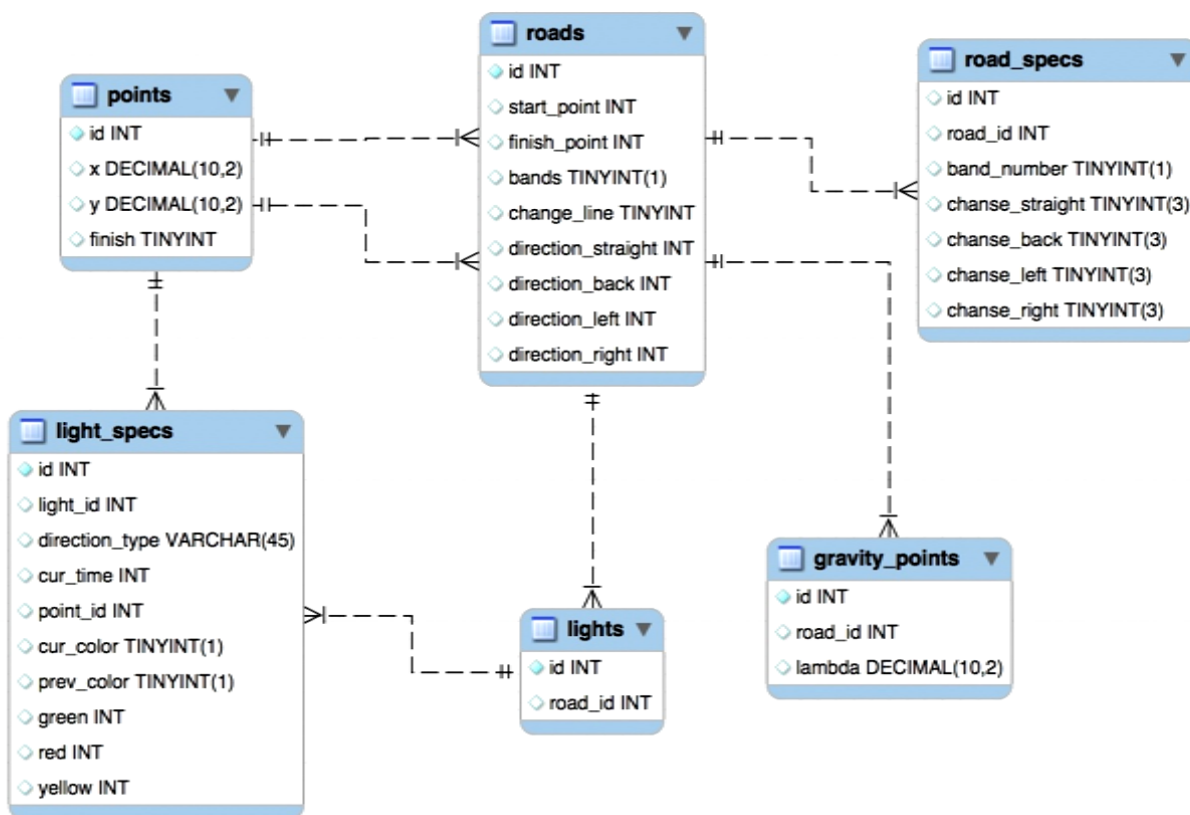


Рис. 5. Структура базы данных

Помимо таблиц для стандартных агентов (автомобиль, светофор, генератор) также присутствуют дополнительные таблицы: точки, дороги, характеристики дорог, характеристики светофора.

Результаты решения задачи моделирования транспортных потоков на примере дорожной системы города Ижевска

В работе рассмотрена реальная система взаимосвязанных перекрестков центральной

части города Ижевска – это транспортная сеть из двух перекрестков [улица 10 лет Октября – улица Пушкинская] и [улица 10 лет Октября – улица Удмуртская]. Демонстрация полученной модели транспортной сети из двух перекрестков представлена на рис. 6.

Имитация образования системы транспортных средств на одном из моделируемых перекрестков в час пик представлена на рис. 7.

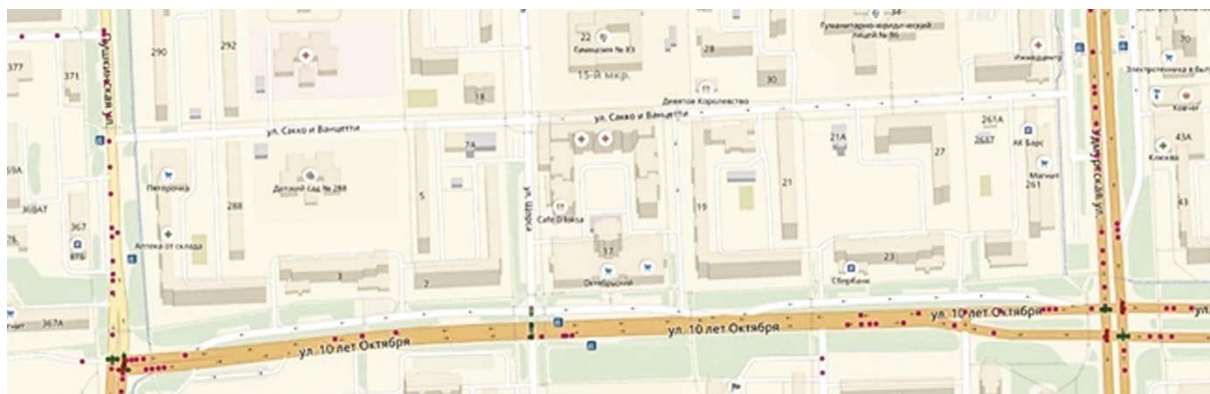


Рис. 6. Имитационная модель группы перекрестков

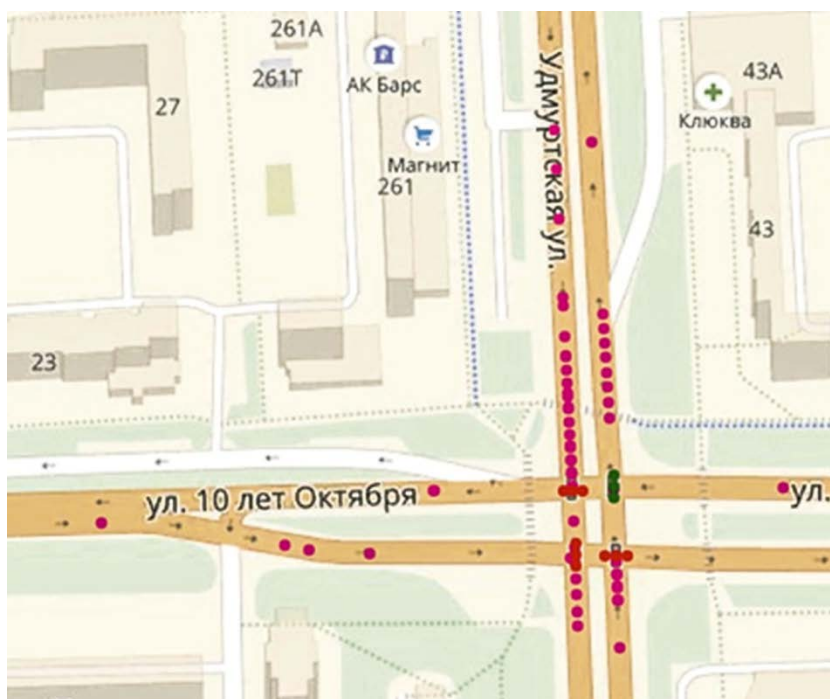


Рис. 7. Имитационная модель перекрестка ул. 10 лет Октября – ул. Удмуртская

В результате решения задачи имитационного моделирования транспортных потоков на примере дорожной системы города Ижевска были получены значения длины очереди L на

каждой полосе движения автомобилей рассмотренного перекрестка. График изменения максимальной длины очереди в системе представлен на рис. 8.

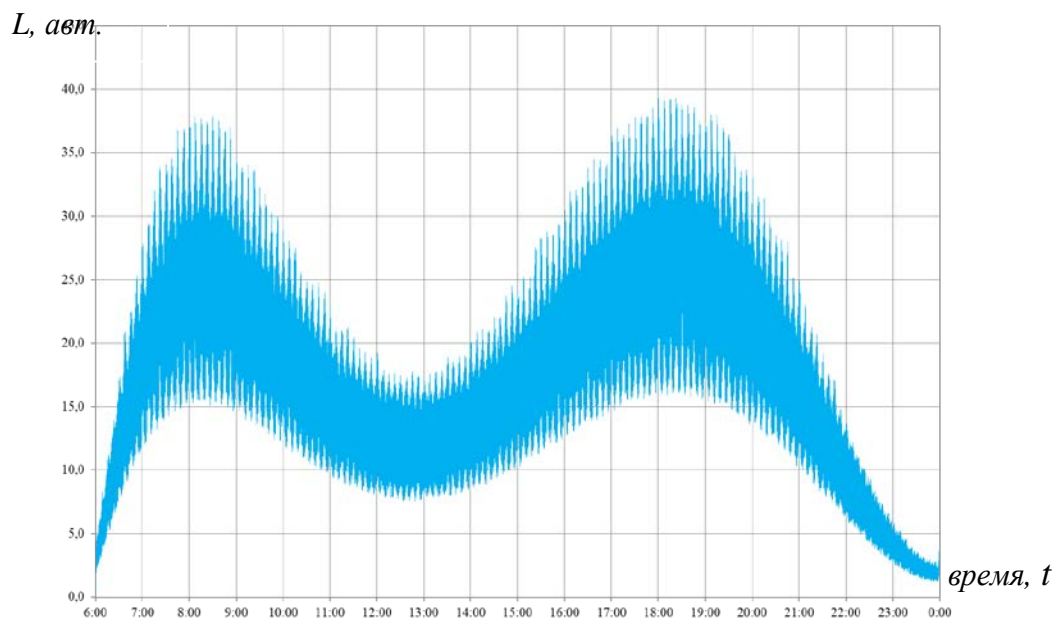


Рис. 8. Изменение максимальной длины очереди перекрестка ул. 10 лет Октября – ул. Удмуртская с 6 часов утра до 24 часов ночи

Из графика, представленного на рис. 8, следует, что максимальная длина очереди в часы наибольшей нагрузки на транспортную сеть достигает до 39 автомобилей. При этом среднее время нахождения автомобиля в заторе составляет 3 минуты. Существует два временных периода возникновения заторов на дорогах: в 7:00–9:00 и 17:00–19:00, в которых показатель максимальной длины очереди колеблется от 15 до 39 автомобилей.

Для решения проблем с заторами необходимо строить оптимальное управление фазами работы светофоров на наиболее нагруженных перекрестках. Задачу оптимизации работы светофоров можно решить на основе полученных данных решения задачи компьютерного имитационного моделирования транспортных потоков. На основе анализа полученных параметров решение задачи оптимизации светофорного регулирования строится с применением различных подходов, апробированных в работах по оптимизации логистических процессов [29, 30].

Заключение

Разработана компьютерная имитационная мультиагентная модель транспортных потоков, включающая в себя три основных агента: автомобиль, светофор, генератор.

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.

В процессе моделирования транспортных потоков в системе фиксируются все необходимые выходные параметры модели. На основе анализа этих параметров далее возможно решение задачи по оптимизации светофорного регулирования с применением различных подходов, апробированных в работах по оптимизации логистических процессов. Построенная компьютерная имитационная модель транспортных потоков в условиях светофорного регулирования может быть использована при проведении практических расчетов для анализа эффективности функционирования любой транспортной системы.

Разработанная компьютерная имитационная 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.

Разработанный инструментальный компьютерного моделирования потоков в городской транспортной сети планируется использовать для оптимизации светофорного регулирования

с целью устранения заторов в транспортных сетях.

Библиографические ссылки

1. 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.
2. Касаткина Е. В. Статистическое исследование дорожно-транспортной обстановки в Удмуртской Республике // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 1. С. 53–59.
3. Информационный сайт Госкомстата России. Транспорт. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (дата обращения: 19.12.2020).
4. Румянцев Е. А., Драгунов А. Ф. Необходимость разработки оценок уровня организации дорожного движения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 227–229.
5. Димова И. П. Повышение эффективности функционирования остановочных пунктов городского пассажирского транспорта и движения транспортных средств в зоне их влияния : дисс. ... канд. техн. наук / Тюменский государственный нефтегазовый университет. Тюмень, 2009.
6. Власов А. А. Теория транспортных потоков : монография. Пенза : ПГУАС, 2014. 124 с.
7. Елинек Й., Высока Я. О подходах в моделировании транспортной динамики // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 1. С. 121–129.
8. Швецов В. И., Алиев А. С. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей. М. : Едиториал УРСС, 2003. 64 с.
9. Ахмадинуров М. М., Завалицин Д. С., Тимофеева Г. А. Математические модели управления транспортными потоками : монография. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2011. 120 с.
10. Строгалев В. П., Толкачева И. О. Имитационное моделирование. М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 280 с.
11. Остроух А. В., Николаев А. Б. Интеллектуальные системы в науке и производстве // Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 312 p. DOI: 978-3-659-98006-0.
12. Macal C., North M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation // Journal of Simulation. 2010. Vol. 4. P. 151-162.
13. Лебедюк Э. А. Агентное моделирование: состояние и перспективы // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2017. № 6 (96). С. 155–162.
14. Понятие агента в системах искусственного интеллекта / О. А. Мелихова, О. В. Вепринцева, В. С. Чумичев и др. // Технические науки – от теории к практике. 2015. № 53. С. 44–51.
15. Galan J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008. Vol. 12. № 1.
16. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 5–63.
17. Ивашкин Ю. А. Мультиагентное имитационное моделирование больших систем: учеб. пособие. М. : МГУПБ. 2008. 230 с.
18. Мезенцев К. А. Мультиагентное моделирование в среде NetLogo // Автоматизация и управление в технических системах. 2015. № 1 (13). С. 10–20. DOI: 10.12731/2306-1561-2015-1-2.
19. Имитационное моделирование в системе NetLogo / И. М. Якимов, А. П. Кирпичников, А. И. Мингараева, Е. Л. Буйнова // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 10. С. 104–107.
20. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. СПб: БХВ-Петербург. 2006. 400 с.
21. Шаймарданов М. Г., Касаткина Е. В. Опыт применения системы AnyLogic при моделировании движения транспортных потоков // Вестник ИжГТУ. 2016. № 2. С. 66.
22. Койнова А. С. Использование AnyLogic для моделирования транспортных процессов // Научный альманах. 2017. № 1-3 (27). С. 83–85. DOI: 10.17117/na.2017.01.03.083.
23. Разработка концепции топливообеспечения распределенной региональной системы теплоснабжения местными возобновляемыми видами топлива / И. Г. Русяк, В. К. Преснухин, К. В. Кетова, С. А. Королев, Е. В. Трушкова // Энергобезопасность и энергосбережение. 2010. № 5. С. 14–20.
24. 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.
25. 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.
26. Логистика топливоснабжения региона возобновляемыми видами топлива, получаемыми из древесного сырья. На примере Удмуртской Республики / И. Г. Русяк, К. В. Кетова, С. А. Королев, Е. В. Трушкова. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2011.
27. Флэнаган Д. JavaScript // Изд-во Вильямс. 2019. 320 с.
28. Браун Э. Learning JavaScript: JavaScript Essentials for Modern Application Development // Изд-во Альфа-книга. 2017. 368 с.
29. Касаткина Е. В. Разработка и тестирование генетического алгоритма для решения задачи

маршрутизации // Прикладная информатика. 2018. Т. 13. № 5 (77). С. 32–43.

30. Кетова К. В., Касаткина Е. В., Насридино-ва Д. Д. Программа структурной оптимизации прогнозных нейросетевых моделей. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RUS 2014618038. Заявка № 2014615568 от 10.06.2014.

References

1. Kuz'mich S.I., Fedina T.O. [Transport problems of modern cities and modeling of traffic load on the road network]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. No. 3. Pp. 159-166 (in Russ.).

2. Kasatkina E.V. [Statistical analysis of traffic enviro]. Vol. 20. No. 1. С. 53-59 (in Russ.).

3. Informacionnyj sajt Goskomstata Rossii. Transport. Available at: <https://rosstat.gov.ru/folder/23455?print=1> (accessed 19.12.2020).

4. Rumyanchev E.A., Dragunov A.F. [Necessity to develop estimates of the traffic organization level]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie / Izd-vo: Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej soobshcheniya*. 2012. No. 2 (34). Pp. 227-229 (in Russ.).

5. Dimova I.P. *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya ostanovochnykh punktov gorodskogo passazhirskogo transporta i dvizheniya transportnykh sredstv v zone ih vliyaniya* [Increasing the efficiency of the functioning of stopping points of urban passenger transport and the movement of vehicles in the zone of their influence]. PhD thesis. Tyumen', 2009 (in Russ.).

6. Vlasov A.A. *Teoriya transportnykh potokov: monografiya* [Traffic flow theory]. Penza: PGUAS, 2014. 124 p. (in Russ.).

7. Elinek J., Vysoka YA. [On approaches to modeling traffic dynamics]. *Vestnik AGTU. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2014. No. 1. Pp. 121–129 (in Russ.).

8. Shvecov V.I., Aliev A.S. *Matematicheskoe modelirovanie zagruzki transportnykh setej* [Mathematical modeling of traffic network loading]. Moscow: Editorial URSS, 2003. 64 p. (in Russ.).

9. Ahmadinurov M.M., Zavalishchin D.S., Timofeeva G.A. *Matematicheskie modeli upravleniya transportnymi potokami* [Mathematical models of traffic management]. Ekaterinburg: Izd-vo UrGUPS, 2011. 120 p. (in Russ.).

10. Strogalev V. P., Tolkacheva I.O. *Imitacionnoe modelirovanie* [Simulation modeling]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2008. 280 p. (in Russ.).

11. Ostrouh A.V., Nikolaev A.B. *Intellektual'nye sistemy v nauke i proizvodstve*. [Intelligent systems in science and industry]. Saarbrücken, Germany: Palmarium Academic Publishing, 2012. 312 p. DOI: 978-3-659-98006-0. (in Russ.).

12. Macal C., North M. Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation. In *Journal of Simulation*. 2010. Vol. 4. Pp. 151-162.

13. Lebedyuk E.A. [Agent-based modelling: state and prospects]. *Vestnik Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova*. 2017. No. 6 (96). Pp. 155-162 (in Russ.).

14. Melihova O.A., Veprinceva O.V., Chumichev V.S. i dr. [The concept of agent artificial intelligence system]. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*. 2015. No. 53. Pp. 44-51 (in Russ.).

15. Galan J. Errors and Artefacts in Agent-Based Modelling // *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 2008. Vol. 12. № 1.

16. Tarasov V.B. [Agents, multi-agent systems, virtual communities: a strategic direction in computer science and artificial intelligence]. *Novosti iskusstvennogo intellekta*. 1998. No. 2. Pp. 5-63 (in Russ.).

17. Ivashkin YU.A. *Mul'tiagentnoe imitacionnoe modelirovanie bol'shih sistem: ucheb. posobie* [Multi-agent simulation of large systems] YU. A. Ivashkin. Moscow: MGUPB. 2008. 230 p. (in Russ.).

18. Mezencev K.A. [Multi-agent simulation in netlogo software]. *Avtomatizaciya i upravlenie v tekhnicheskikh sistemah*. 2015. No. 1 (13). Pp. 10-20. DOI: 10.12731/2306-1561-2015-1-2. (in Russ.).

19. YAkimov I.M., Kirpichnikov A.P., Mingaraeva A.I., Bujnova E.L. [Simulation modeling in NetLogo system]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 20, no. 10. Pp. 104-107 (in Russ.).

20. Karpov YU.G. *Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5* [Simulation of systems. Introduction to Modeling with AnyLogic 5]. St. Petersburg: BHV-Peterburg. 2006. 400 p. (in Russ.).

21. SHajmardanov M.G., Kasatkina E.V. [Experience in using the AnyLogic system in modeling traffic flows]. *Vestnik IzhGTU*. 2016. No. 2. Pp. 66 (in Russ.).

22. Kojnova A.S. [Use AnyLogic for simulation of transport processes]. *Nauchnyj al'manah*. 2017. № 1-3 (27). Pp. 83-85. DOI: 10.17117/na.2017.01.03.083. (in Russ.).

23. Rusyak I.G., Presnuhin V.K., Ketova K.V., Korolev S.A., Trushkova E.V. [Development of the concept of fuel supply distributed regional heating system of local renewable fuels]. *Energobezопасnost' i energosberezenie*. 2010. No. 5. Pp. 14-20 (in Russ.).

24. Ketova K.V., Trushkova E.V., Krivenkov R.YU. [Application of cluster analysis to solve the problem of energy resources optimal allocation]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2010. No. 2. Pp. 207-213 (in Russ.).

25. Ketova K.V., Trushkova E.V. [The solution of the logistics task of fuel supply for the regional distributed heat supply system]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie*. 2012. Vol. 4. No. 2. Pp. 451–470 (in Russ.).

26. Rusyak I.G., Ketova K.V., Korolev S.A., Trushkova E.V. [Logistics of fuel supply of the region with renewable fuels obtained from wood raw materials]. *Logistika toplivosnabzheniya regiona vozobnovlyaemyimi vidami topliva, poluchaemyimi iz*

drevesnogo syr'ya. Na primere Udmurtskoj Respubliki / Ministerstvo obrazovaniya i nauki Rossijskoj Federacii, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovaniya «Izhevskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet». Izhevsk, 2011 (in Russ.).

27. Flenagan D. JavaScript // Izd-vo Vil'yams. 2019. 320 p.

28. Braun E. Learning JavaScript: JavaScript Essentials for Modern Application Development // Izd-vo Alfa-kniga. 2017. 368 p.

29. Kasatkina E.V. [Development and testing of a genetic algorithm to solve the routing problem]. *Prikladnaya informatika*. 2018. Vol. 13. No. 5. Pp. 32-43 (in Russ.).

30. Ketova K.V., Kasatkina E.V., Nasridinova D.D. *Programma strukturnoj optimizacii prognoznyh nejrosetevyh modelej. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM RUS* [Program for structural optimization of predictive neural network models]. 2014618038. Zayavka № 2014615568 от 10.06.2014. (in Russ.).

* * *

Computer Simulation of Flows in the Urban Transport Network

E. V. Kasatkina, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K. V. Ketova, DSc (Physics and Mathematics), Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper presents an approach to modeling traffic flows under traffic light regulation. A computer simulation multi-agent model of traffic flows has been developed, which includes three main agents: a car, a traffic light, and a generator. A calculated simulation algorithm for driving cars on road lanes and a simulation algorithm for their behavior at intersections have been developed. A computer multi-agent model and a simulation calculation algorithm for the behavior of cars in the transport network are implemented in the form of an intelligent analytical system, which also includes a database on the characteristics of the movement of cars, designed in the MS SQL DBMS environment, and a module for visualizing all processes.

The components of the traffic flow simulation model are the coordinate system (map), the dynamic objects themselves (car, traffic light, car input flow generator), the time interval counter and the car movement algorithm. In the process of modeling traffic flows, the necessary output parameters of the model are recorded in the system.

On the example of one of the road sections of the city of Izhevsk, the possibilities of the implemented model are demonstrated. The developed computer simulation multi-agent model allows you to calculate the average length of the queue of vehicles at any time of the day, taking into account the intensity of incoming traffic flows.

Keywords: computer simulation, multi-agent model, traffic flow.

Получено: 22.12.2020