

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт естественных и точных наук
Кафедра «Уравнения математической физики»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Рецензент, доцент кафедры АТ
канд. техн. наук, доцент
_____/ В.Д. Шепелев
« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой УМФ,
д-р физ.-мат. наук, профессор
_____/ Г.А. Свиридюк
« ____ » _____ 2020 г.

УРАВНЕНИЕ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ЮУрГУ–01.04.01.2020.063.ВКР

Руководитель работы,
Заведующий кафедрой МиКМ,
д-р физ.-мат. наук, доцент
_____/ С.А. Загребина
« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы,
студент группы ЕТ-221
_____/ А.И. Глушков
« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер,
доцент кафедры УМФ,
канд. физ.-мат. наук, доцент
_____/ Д.Е. Шафранов
« ____ » _____ 2020 г.

АННОТАЦИЯ

Глушков А.И. Уравнение дорожного движения. – Челябинск: ЮУрГУ, ЕТ-221, 38 с.

Выпускная квалификационная работа была выполнена с целью разработки уравнения дорожного движения как адекватной математической модели транспортной регулируемой сети города Челябинска.

Для этого были проработаны тематические первоисточники как Российских научных школ, так и зарубежных авторских направлений, касающиеся оптимизации и безопасности в транспортной сети. Также проявлена общая схема системы управления транспортными потоками, являющаяся методологической основой для дальнейших исследований.

Во второй главе рассмотрен ряд автономных статистических исследований, касающихся выявления общих тенденций в сети. Предложена методика получения уравнения дорожного движения на примере исходных данных с 25 перекрёстков транспортной сети города Челябинска. Эта математическая модель, как уравнение дорожного движения, получена в виде линейного уравнения регрессии, связывающего 20 фиксируемых с видеокамер параметров анализируемых перекрёстков. Данная модель предполагает её последующее применение в более динамичных исследованиях, как например – имитационном моделировании динамики транспортных потоков на регулируемом перекрёстке.

Библиогр. список – 30 наименований; рисунков – 9 шт. из них 5 цветных; таблиц – 8 шт.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ	6
1.1. Постановка задачи управления транспортным потоком города	6
1.2. Основные подходы к разработке моделей транспортных потоков	8
1.3. Выводы по первой главе	13
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГОРОДА	15
2.1. Компьютерная модель узла светофорного регулирования транс- портным потоком	15
2.2. Особенности прохождения транспортным потоком регулируемого перекрёстка	20
2.3. Классификация узлов регулируемой транспортной сети города	24
2.4. Выводы по второй главе	31
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	33
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	35

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих городах мира наблюдается значительный рост количества транспортных средств, что приводит к обострению проблем и противоречий в дорожно-транспортной системе. Особенно это касается заторов на дорогах, так как наличие заторов приводит к ряду негативных последствий: увеличению времени в пути, дополнительному расходу топлива и износу транспортных средств, стрессу и раздражению водителей и пассажиров, отравлению окружающей среды и др.

Для решения проблемы заторов необходимо иметь надежную систему сбора информации о ситуации на дорогах и хорошо развитый метод анализа собранной информации. В настоящее время, как правило, сбор необходимой информации осуществляется с помощью мультисенсорных видеокамер, стационарно установленных как на узлах регулируемой транспортной сети, так и в проблемных её местах. Отличительной особенностью работы видеокамер является также и регистрация пешеходов, переходящих дорогу на перекрестке, что позволяет включить в последующий анализ пешеходный поток как возмущающий фактор транспортного движения.

Но основными проблемами создаваемых ныне автоматизированных систем управления транспортными потоками в сетях произвольного масштаба, является обеспечение безопасности дорожного движения, а также – повышение пропускной способности регулируемой транспортной сети.

Объект данного исследования – транспортная регулируемая светофорная сеть города Челябинска.

Предмет – повышение пропускной способности регулируемых узлов транспортной сети.

Цель работы – на базе анализа видеозаписей с дорожных камер, получить уравнение дорожного движения, наиболее адекватно отражающее ситуацию в транспортной сети.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- проявить задачи управления транспортным потоком города;
- рассмотреть основные подходы к разработке моделей транспортных потоков;
- на основе статистического анализа, выявить основные тенденции в регулируемом транспортном движении города;
- получить уравнение дорожного движения как одну из моделей, адекватно отражающую ситуацию в транспортной сети.

В качестве первоисточников использованы труды как Российских научных школ (Свиридюк Г.А.), так и многих зарубежных авторских направлений, касающихся исследований различных аспектов управления транспортной сети. В творческом коллективе с ведущими специалистами автотранспортного факультета ЮУрГУ (Шепелев В.Д., Алюков В.С.), автором данной работы опубликована одна статья, входящая в систему цитирования Scopus, и ещё одна статья находится на рассмотрении в международном научном журнале.

1. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

В первой главе проявлены современные подходы к организации безопасности городской сети дорожного движения и его оптимизации посредством управления объектами светофорного регулирования. Также определена задача данной работы, подробно рассматриваемая в последующей главе.

1.1. Постановка задачи управления транспортными потоками города

В первом разделе рассматривается проблема управления транспортными потоками с привлечением современных средств контроля - видеорегистраторов и видеокамер, работающих в онлайн-режиме.

Управление объектами улично-дорожной сети со светофорной сигнализацией включает определение количества и последовательности фаз регулирования, составление базисных схем движения транспортных средств и пешеходов в каждой из фаз, расчет длительности тактов и фаз, образующих цикл регулирования [7,8]. Циклом регулирования называют периодически повторяющуюся последовательность всех фаз, а режимом регулирования – количество, порядок чередования и продолжительность отдельных фаз и тактов, длительность всего цикла.

В настоящее время прорабатывается множество научных направлений по оптимизации пропускной способности как отдельного светофорного объекта, так и более крупной транспортной сети, состоящей из множества таких взаимосвязанных регулируемых объектов.

Важнейшим фактором в задачах настройки и моделирования интеллектуальных транспортных систем, является очередь транспортных средств на перекрестке в ожидании проезда. Поэтому одно из важных направлений – это разработка интеллектуальных систем мониторинга дорожного движения с использованием дорожных камер [13,14,26]. Информация собирается с помощью сенсорных стационарных видеокамер с разумным уровнем точности. Отличительной особенностью является учет пешеходов, пересекающих пере-

крестки в разных направлениях. Наиболее распространенными и часто используемыми системами видеонаблюдения в России являются "Стрелка", "Кордон", "Рапира" и некоторые другие.

Количество фото- и видеокамер, фиксирующих ситуацию на дорогах стран мира, растет с каждым годом. Камеры, безусловно, делают дороги безопаснее и помогают организовать устойчивость транспортной системы. Автоматический анализ деятельности транспортных средств при мониторинге дорожного движения в городах является важной и актуальной проблемой в связи с большим количеством нарушений правил дорожного движения и их негативным влиянием на повседневное управление дорожным движением.

Общий подход к созданию автоматизированной системы управления транспортными потоками города можно представить в следующем виде (рисунок 1.1).

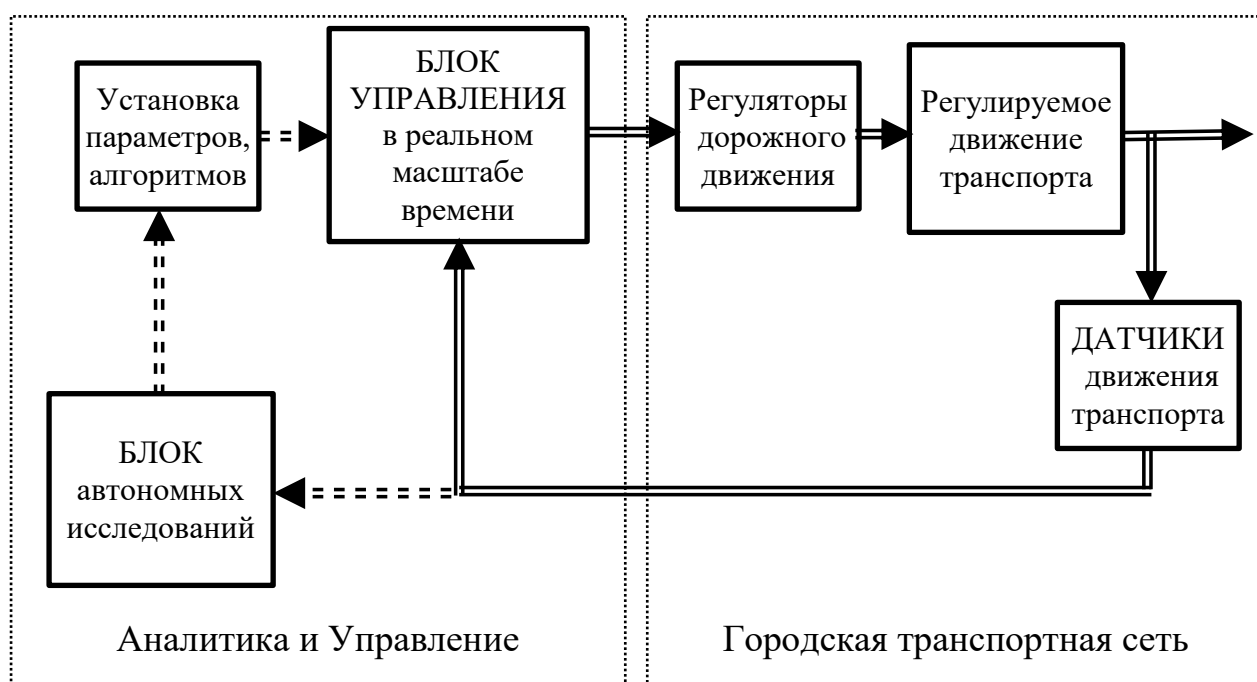


Рисунок 1.1 – Общая схема системы управления транспортными потоками

Это большая и ответственная задача в пределах городского масштаба, вписывающаяся в пилотный проект «Умный город» [30]. В рамках этого проекта планируется внедрение уличного наблюдения с точки зрения оптимизации дорожного трафика, предсказания и идентификации аварий с применением технологий машинного зрения; внедрение системы автоматической фо-

товидеофиксации нарушений правил дорожного движения; организация интеллектуального управления городским общественным транспортом; внедрение системы отслеживания передвижения общественного транспорта в онлайн-режиме.

В качестве одного из начальных этапов проработки блока Аналитики и Управления, предлагается к решению одно из автономных исследований, как стартовая задача: моделирование и анализ пропускной способности объектов светофорного регулирования – перекрёстков, в зависимости от ряда влияющих факторов как детерминированного характера влияния (геометрия перекрёстка, качество дорог и т.п.), так и случайного (поток пешеходов, погодные условия, категоричность транспортных средств).

В дальнейшем результаты такого анализа могут служить исходным материалом для решения задач оптимизации как пропускной способности городской транспортной сети, так и её безопасности.

1.2. Основные подходы к разработке моделей транспортных потоков

В данном разделе рассматривается ряд различных современных подходов к моделированию и исследованию транспортных потоков в целях последующей оптимизации пропускной способности транспортной сети, а также в целях обеспечения безопасности дорожного движения.

Проблема управления транспортными потоками, призвавшая в жизнь множественность и разнообразность подходов её решения, определяется следующими положениями. В настоящее время во многих городах мира наблюдается значительный рост количества транспортных средств, что приводит к обострению проблем и противоречий в дорожно-транспортной системе. Особенно это касается заторов на дорогах, так как наличие заторов приводит к ряду негативных последствий: увеличению времени в пути, дополнительному расходу топлива и износу транспортных средств, стрессу и раздражению водителей и пассажиров, отравлению окружающей среды и др. Для решения

проблемы заторов необходимо иметь надежную систему сбора информации о ситуации на дорогах и хорошо развитый метод анализа собранной информации.

1-ый подход. В 50-е годы прошлого века, в связи с бурным развитием газовой динамики, появились первые макроскопические (гидродинамические) модели, в которых транспортный поток уподобляется потоку «мотивированной» сжимаемой жидкости, и первые микроскопические модели, в которых явно выписывается уравнение движения каждого автомобиля [2].

В модели Лайтхилла–Уизема (1955) транспортный поток уподобляется потоку сжимаемой жидкости и описывается законом сохранения количества автомобилей. При этом в модели постулируется существование функциональной зависимости между величиной потока автомобилей и плотностью. Эту зависимость часто называют фундаментальной диаграммой (как правило, вогнутая функция).

В последующие годы класс микро- и макромоделей был значительно расширен.

В современном макроскопическом подходе (А. Эу и М. Раскль, 2000) транспортный поток часто описывается нелинейной системой гиперболических уравнений (для плотности и скорости потока) с диффузией. При этом уравнение состояния «зашивается» как стремление водителей двигаться с желаемой скоростью.

В современном микроскопическом подходе преобладают модели типа «разумного водителя», в которых ускорение автомобиля описывается некоторой функцией от скорости этого автомобиля, расстояния до впереди идущего автомобиля (лидера) и скорости относительно лидера. При этом в таких моделях и время может течь дискретно, и сама динамика движения автомобилей может быть стохастической (марковской).

Математическая теория управления транспортными потоками активно развивается в работах калифорнийской школы, возглавляемой П. Варайя и А. Б. Куржанским. Исходя из модели клеточных автоматов, предлагается способ

оптимального управления светофорами и въездами на магистралях в Калифорнии. Основная авторская идея того, как следует управлять: задача управления (светофорами или въездами на основные магистрали) заключается в том, чтобы большую часть времени среднестатистический водитель проводил в одном из двух типовых режимов для стационарного потока транспорта, различающиеся плотностью и скоростью. Очевидно, что более выгодным режимом является режим с большей скоростью.

2-ой подход. Моделирование транспортного потока в системе перекрёстков с учётом эффекта ретардации, свойственной вязкоупругим несжимаемым жидкостям [3, 6,9]. Для этого рассматривается система уравнений Осколкова, описывающая транспортный поток, на восьмирёберном геометрическом графе, с которым ассоциируется перекрёсток – с соблюдением условий непрерывности транспортного потока и его баланса по всем ветвям графа.

При привлечении к моделированию транспортного потока на одном перекрёстке математического аппарата линейных неоднородных уравнений, построенных по соболевскому типу

$$L\dot{u} = Mu + f, \quad (1)$$

с относительно p -ограниченным оператором, в работе [6] доказываемая однозначная разрешимость модели дорожного движения на перекрёстке с многоточечным начально-конечным условием. А при моделировании транспортного потока со множеством перекрёстков и проведении редукции такой модели к уравнениям соболевского типа, наряду с аналогичным доказательством их однозначной разрешимости, разработаны алгоритмы их численного решения.

3-ий подход. Характерен для большинства современных практических решений по организации автоматизированных систем управления транспортными потоками с применением видеокамер [15,19]. В современных решениях предусматривается в режиме он-лайн отслеживать потоки транспортных средств с их разделением по категорийности транспорта и вести последующую обработку в соответствии с разработанными алгоритмами, проводя ана-

литический мониторинг текущей ситуации в режиме реального времени.

Особенностью таких автоматизированных систем сбора информации является то, что метки наблюдений (рисунок 1.2) размещаются на изображениях, полученных с видеокамер непосредственно, а не с фотографий с камер видеонаблюдения, как это делалось ранее в подавляющем большинстве подобных исследований.



а) Изображение с дорожной видеокамеры



б) Изображение с отметками наблюдения

Рисунок 1.2 – Онлайн-режим размещения меток на изображении автотранспорта

При обработке изображений используется спектральный анализ изображений [23]. Спектр изображения получается прямым двумерным преобразованием Фурье функции, описывающей изображение:

$$F(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-i(\omega_x x + \omega_y y)) dx dy, \quad (2)$$

Формула (2) связывает вещественную функцию, описывающую яркость изображения, со сложной частотной функцией-спектром изображения:

$$F(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \cos(\omega_x x + \omega_y y) dx dy + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (-f(x, y)) \sin(\omega_x x + \omega_y y) dx dy = \text{Re}(\omega_x, \omega_y) + i \text{Im}(\omega_x, \omega_y), \quad (3)$$

Такие модели управления позволяют формировать подключенные транспортные средства в группы так, чтобы транспортные средства могли проходить через перекрестки вместе без остановок или с наименьшим временем остановки. Также они позволяют оптимизировать планы синхронизации сигнала вдоль артерии для достижения более низкой задержки сигнала и более высокой пропускной способности [12, 23].

Еще одной особенностью такого метода распознавания можно считать то, что системы могут работать с камерами низкого качества. Что существенно повышает надёжность долгосрочного режима работы автоматизированных систем, базирующихся на этом методе.

4-ый подход. Большая группа конкурирующих и разнообразных методов, предполагающих статистическую обработку информации о транспортных потоках, снятых и записанных со стационарных уличных видеокамер (режим оф-лайн).

Наиболее характерные подходы этого направления:

а) разработка адаптивных обучающих контроллеров представления состояния статистики потока транспортных средств (т. е. очереди транспортных средств и плотность) [16, 22];

б) применение комбинаторной задачи структурной оптимизации цикла светофора, позволяющей создать наиболее оптимальные схемы разделения фаз в соответствии со статистически установленным спросом на трафик [17];

в) разработка математического описания динамики транспортных потоков – макроскопические модели, которые описывают движение с точки зрения плотности, а также микроскопические модели многих частиц, в которых

каждая частица соответствует транспортному средству [21];

г) оценка и классификация перенасыщенного состояния потока транспортных средств – на основе расстояния между перекрестками, спроса на трафик и пропускной способности перекрестков [24];

д) система измерения параметров транспортных потоков по разнице времени прохождения на двух перекрестках [18].

Как правило, такие методы занимают своё место в «Блоке автономных исследований» общей схемы системы управления транспортными средствами (рисунок 1.1), а результатом своей деятельности предусматривают моделирование различных фрагментов транспортной сети и разработку обоснованных решений для формирования управленческих алгоритмов автоматизированных он-лайн систем управления.

1.3. Выводы по первой главе

В первой главе рассматривается проблема управления транспортными потоками с привлечением современных средств контроля – видеорегистраторов и видеокамер, работающих в онлайн-режиме. Также проявлен современный подход к организации безопасности городской сети дорожного движения и его оптимизации посредством управления объектами светофорного регулирования.

Также рассматривается ряд различных современных подходов к моделированию и исследованию транспортных потоков:

а) общие взгляды на моделирование транспортных потоков как потока «мотивированной» сжимаемой жидкости, а также формирование как микро-, так и макромоделей транспортных потоков;

б) решение вопроса моделирования и разрешимости проблем затора в транспортной сети на основе модели узлов сети как конечных связных геометрических графов;

в) современные практические решения по организации автоматизированных систем управления транспортными потоками с применением уста-

новленных на дорогах и в узлах сети видеокамер, работающих в онлайн-режиме;

г) методы, предполагающие статистическую обработку информации о транспортных потоках, снятых и записанных со стационарных уличных видеокамер (режим оф-лайн).

Общая объединяющая цель современных подходов исследования транспортных сетей – оптимизация пропускной способности транспортной сети, а также обеспечение безопасности дорожного движения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ГОРОДА

Во второй главе представлены апробированная методика получения уравнения дорожного движения на примере перекрёстков транспортной сети города Челябинска, также освещены исследования по характеру прохождения транспортными средствами различных перекрёстков и проведена классификация перекрёстков по схожести их прохождения транспортными средствами. Подобная классификация способствует более адекватному моделированию узлов транспортной сети – регулируемых перекрёстков.

2.1. Компьютерная модель узла светофорного регулирования транспортным потоком

В данном разделе рассматривается построение уравнения движения транспорта на регулируемом перекрёстке при повороте направо. Особенностью данной разработки является случайный характер потока пешеходов, прерывающий поток транспортных средств.

В соответствии с общепринятой технологией компьютерного моделирования [4,5,10], рассмотрим построения модели для части регулируемого перекрёстка: поворот направо при наличии пешеходного перехода.

Движение транспорта при повороте направо прерывается потоком пешеходов, пересекающих дорогу по пешеходному переходу. Этот поток является непредсказуемым по его плотности, длительности и количеству интервалов прерывания, в которые транспортные средства могут начинать движение. Сами транспортные средства также различаются по их принадлежности к различным классам, что определяет их инерционность при разгоне, протяжённость и различие в интервалах между ними.

Для исследования влияние этих факторов на пропускную способность желательно проявить их независимое влияние, что возможно определить только при помощи компьютерного моделирования. Так как в реальной ситу-

ации проведение натуральных экспериментов некорректно или нереализуемо.

Цель моделирования – исследовать влияние как потока пешеходов, так и его различных параметров на пропускную способность транспортных средств на регулируемом перекрёстке (поворот направо).

Для построения компьютерной модели перекрёстка необходимо, в первую очередь, смоделировать конкретный перекрёсток учитывающий его геометрические параметры. А далее сформировать блок потока транспортных средств и блок возмущающего фактора – непредсказуемого потока пешеходов. Графически концептуальная модель выглядит следующим образом (рисунок 2.1).

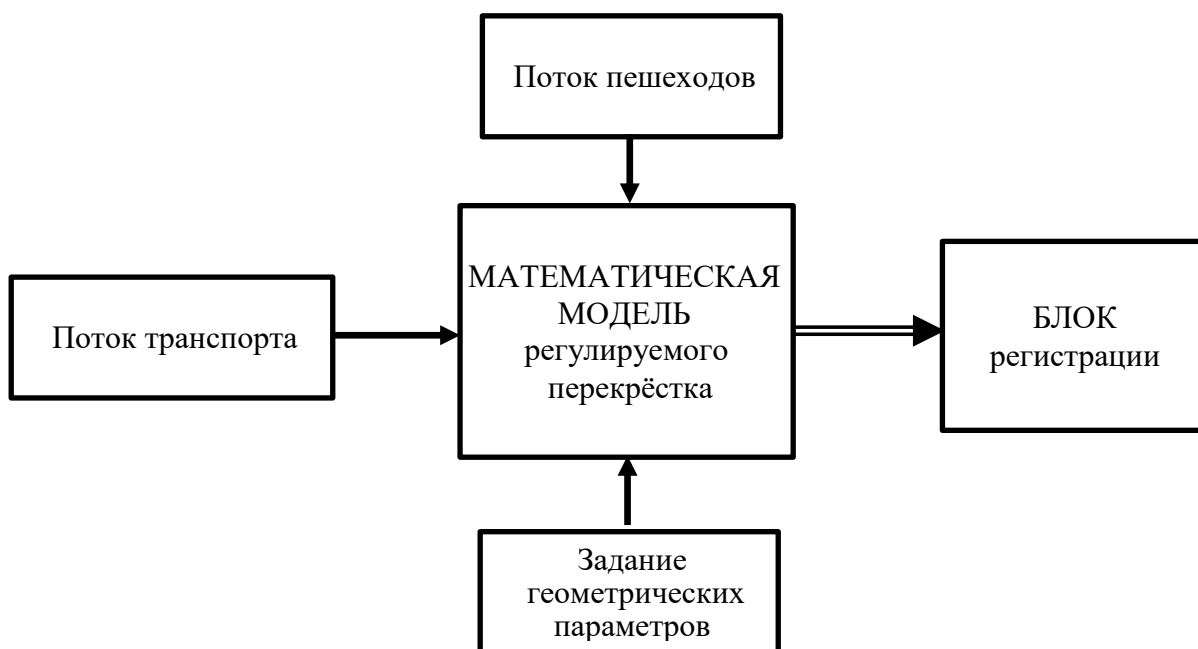


Рисунок 2.1 – Концептуальная модель регулируемого перекрёстка

Общую математическую модель перекрёстка желательно получить в виде регрессионного уравнения от ряда влияющих на пропускную способность факторов:

$$Y_{np} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = k_0 + k_1 * x_1 + k_2 * x_2 + k_3 * x_3 + \dots + k_n * x_n \quad (4)$$

В нашем распоряжении есть сводные данные с камер видеонаблюдения за 25 перекрёстками города Челябинска [28], включающие в себя как параметры самого перекрёстка, так и данные о движении транспорта. Регистрируемые факторы отражены во втором столбце таблицы 2.1.

В целях определения избыточности выделенных в анализе факторов и оценке силы их как взаимовлияния, так и влияния на зависимую переменную (пропускная способность транспортных средств перекрёстка, поворот направо), целесообразно провести корреляционный анализ.

Таблица 2.1 – Фиксируемые факторы перекрёстков и их взаимосвязь

№	Фактор	Корреляция с Y_{np}	k_i нестандартизированные	k_i стандартизированные
1	Длительность разрешающего сигнала светофора, с	,438	,303	1,275
2	L1, м	,017	-,184	-,396
3	L2, м	,296	,189	,573
4	L3, м	,278	,049	,062
5	Количество пешеходов по ходу движения ТС (справа), ед	-,390	-,117	-,159
6	Количество пешеходов по ходу движения ТС (слева), ед	-,529	-,280	-,417
7	Продолжительность 1-го свободного окна в пешеходном потоке для проезда, с	,188	-,099	-,268
8	Количество проехавших ТС в 1-е окно, ед	,267	,272	,232
9	Продолжительность 2-го свободного окна в пешеходном потоке для проезда, с	,146	,102	,166
10	Количество проехавших ТС в 2-е окно, ед	,373	,461	,426
11	Продолжительность 3-го свободного окна в пешеходном потоке для проезда, с	-,109	-,392	-,210
12	Количество проехавших ТС в 3-е окно, ед	-,016	,531	,106
13	Время проезда через окно в пешеходном потоке, с	-,062	,056	,098
14	Количество ТС в очереди вследствие ожидания прохода пешеходов, ед	,282	,099	,098
15	t1 - время движения 1-го ТС от стоп-линии до начала закругления, с	-,054	-,068	-,046
16	t2 - время движения 1-го ТС по дуге (до выхода с поворота), с	,009	,242	,250
17	t3 - время движения 1-го ТС на отрезке приближения к пеш переходу после выхода с поворота, с	,115	,110	,041
18	t4 - время покидания 1-го ТС перехода (учит. расстояние 1 м до пешеходного перехода и его освобождение), с	-,185	,358	,522
19	Количество ТС, завершающие проезд на красный сигнал светофора, ед	-,220	,013	,005
20	Выборка по максимальному кол-ву ТС, проезжающего без пешеходов, ед	,358	-,360	-,752
21	Фактическое количество проезжающих автомобилей, ед.	Y_{np}	0.613	---

Корреляционный анализ показывает взаимное влияние факторов, а его результаты показаны в третьем столбце таблицы 2.1. Как и следовало ожидать, основное влияние на пропускную способность оказывает длительность разрешающего сигнала (x_1), так и количество пешеходов (x_5 , x_6). Геометрия перекрёстка определяет его индивидуальность (x_2 , x_3 , x_4) и требует обязательного учёта в модели перекрёстка. Соотношение влияний различных факторов можно оценить по величине стандартизированного коэффициента, характеризующего относительную силу влияния каждого фактора на зависимую переменную (столбец 4 в таблице 2.1).

Качество модели оценивается по значению $R^2 = 0,902$. Это означает, что 92% дисперсии, проявленной в исходных данных, объясняется данной моделью. Это весьма высокое значение, подтверждающее высокое качество полной модели.

Но для практического использования модели её целесообразно уменьшить, выбросив ряд второстепенных по влиянию на пропускную способность факторов.

В конечном итоге целесообразно оставить в модели необходимые по физическому смыслу факторы, а также значимые по влиянию факторы. И, конечно же, соответствующие постановке задачи факторы – поток пешеходов и транспорта в очереди.

В окончательном виде математическая регрессионная модель принимает следующий вид:

$$Y_{np} = k_0 + k_1 * x_1 + k_2 * x_2 + k_3 * x_3 + k_5 * x_5 + k_6 * x_6 + k_{16} * x_{16} + k_{18} * x_{18} + k_{20} * x_{20} \quad (5)$$

где: x_1 - длительность разрешающего сигнала светофора;

x_2 , x_3 – геометрия перекрёстка;

x_5 , x_6 – количество пешеходов справа и слева;

x_{16} – время движения ТС по дуге перекрёстка;

x_{18} – время покидания ТС пешеходного перехода;

x_{20} – максимальное количество транспорта, проезжающего без пешеходов.

А качество такой усечённой модели составляет $R^2 = 0,749$. Статистическая значимость модели = 0,12%, что, несмотря на усечение модели, подтверждает высокий уровень её качества и достоверности (таблица 2.2).

Таблица 2.1 – Качественные показатели усечённого уравнения регрессии

Регрессионная статистика		Дисперсионный анализ					
Множественный R	0,8652					Значимость F	
R-квадрат	0,7486	df	SS	MS	F		
Нормированный R-квадрат	0,6229	Регрессия	8	107,8	13,48	5,956	0,001235
Стандартная ошибка	1,5044	Остаток	16	36,21	2,263		
Наблюдения	25	Итого	24	144,07			

В числах уравнение (5) имеет вид:

$$Y_{np} = 0,451 + 0,227 * x_1 + 0,047 * x_2 + 0,141 * x_3 - 0,252 * x_5 - 0,288 * x_6 + 0,275 * x_{16} + 0,220 * x_{18} - 0,138 * x_{20} \quad (6)$$

В конечном итоге концептуальная модель принимает следующий вид:

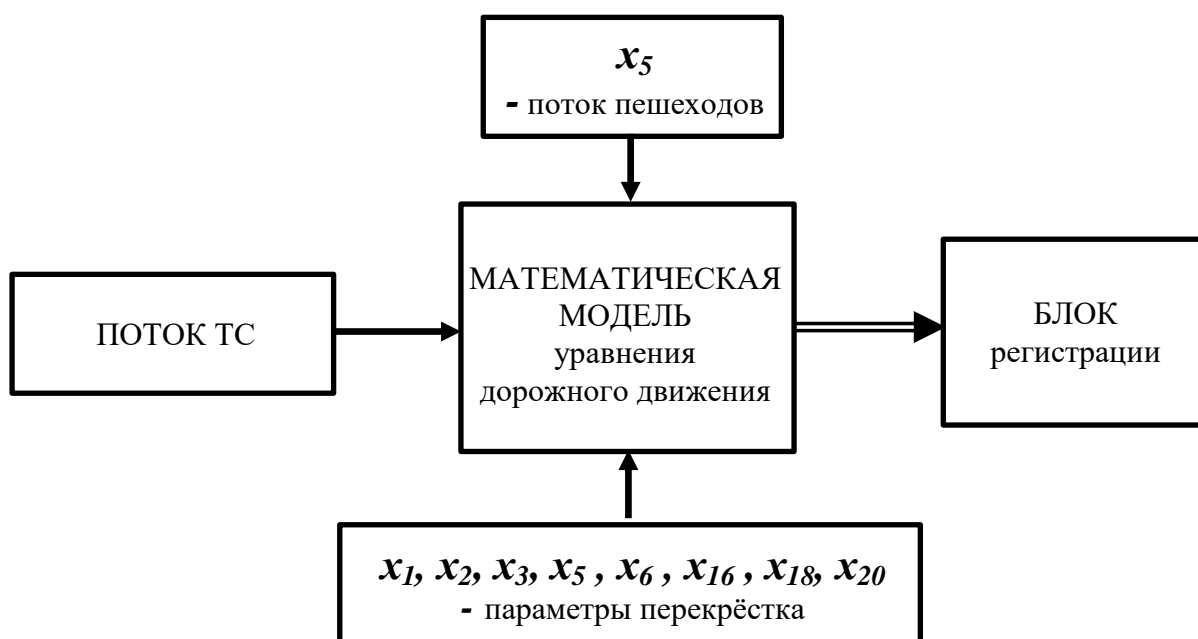


Рисунок 2.2 – Блок-схема математической модели регулируемого перекрёстка

Уравнение (6) представляет собой искомое «Уравнение дорожного движения», которое можно применять как в численных расчётах моделирования различных дорожных ситуаций, так и в разработке имитационной статической модели узла регулируемого дорожного движения.

2.2. Особенности прохождения транспортным потоком регулируемого перекрёстка

В данном разделе рассматриваются методы анализа динамических параметров транспортных средств с целью оценки влияния остановки транспортных средств в очереди на пропускную способность перекрестков. Рассматриваются следующие подзадачи: снижение времени прохождения перекрёстка из-за остановки транспортных средств перед светофором и определение статистической значимости изменения времени прохождения перекрёстка.

В Челябинске имеется более 40 камер наблюдения, большинство из которых установлены высоко над главным перекрестком, чтобы дать общий обзор дорожной ситуации. По сравнению с низкоуровневыми системами видеонаблюдения [25] эти камеры обеспечивают стабильные 25 кадров в секунду, поддерживая разрешение 1920×1080 . Однако видеопоток не идеален из-за артефактов сжатия, размытия и аппаратных сбоев.

Для проведения исследования выбрана камера, которая контролирует один из самых проблемных перекрестков в городе Челябинске – пересечение улицы Энгельса и проспекта Ленина (рисунок 2.3). Это осознанный выбор, чтобы с достаточной точностью обнаружения транспортных средств получить достаточные по качеству результаты.



Рисунок 2.3 – Изображение с видео-камеры на регулируемом перекрёстке

Общая концептуальная модель исследования представлена следующими взаимообусловленными этапами [27]:

- а) подработка исходных данных с целью придания им однородности;
- б) анализ средних значений времени прохождения перекрёстка транспортными средствами, находящимися в различных начальных положениях;
- в) определение статистической значимости изменения времени прохождения перекрёстка из-за остановки транспортных средств.

1. Формирование однородной выборки

Для минимизации искажений результатов исследования подобрана выборка прохождения перекрёстка схожими транспортными средствами. Для анализируемого перекрёстка это транспортные средства категории М – транспортные средства, имеющие не менее четырех колес и используемые для перевозки пассажиров [29]. Также из выборки исключены наблюдения с транспортными средствами категории М3 (допустимая максимальная масса которых превышает 5 т.), которые также будут вносить искажения в результаты за счёт своих габаритов и инерционности.

Также отсеяны наблюдения, выпадающие из общей структуры прохождения перекрёстка – которые имеют короткую очередь без транспортных средств, проезжающих перекрёсток без остановки. Исходная выборка сократилась на 38% и составила 1128 наблюдений для транспортных средств категорий М1 и М2. Визуальная иллюстрация эмпирических данных, принятых к анализу, отражена на рисунке 2.4.

2. Снижение времени прохождения перекрёстка из-за остановки в очереди

В подготовленной однородной выборке наблюдений прохождения перекрёстка транспортными средствами, определены также и интервалы времени въезда ТС на перекрёсток, что позволит в дальнейшем решить аналогичные исследовательские задачи. Основная же информация по данному исследованию – среднее по выборке время прохождения перекрёстка, разбита на 4 позиции в соответствии с местом нахождения ТС и представлена в таблице 2.1.

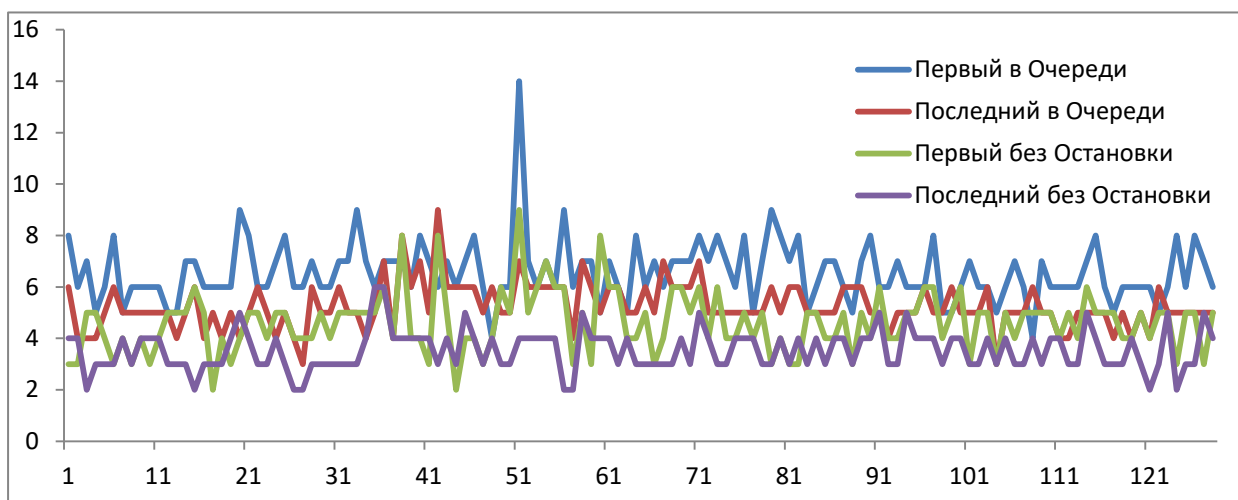


Рисунок 2.4 – Эмпирические данные о времени прохождения перекрёстка

Таблица 2.1 – Изменение времени прохождения перекрёстка

Положение ТС	Время прохождения перекрёстка, с	Снижение скорости, %
Первое ТС, стоящее в очереди	6,56	57,8
Последнее ТС, стоящее в очереди	5,25	67,3
Первое ТС, проезжающее без остановки	4,62	76,5
Последнее ТС, проезжающее без остановки	3,53	100

Как следует из проведённых расчётов, скорость прохождения транспортным средством свободного перекрёстка снижается в зависимости от наличия очереди, практически вдвое (до 58%). Но для окончательного подтверждения достоверности полученных результатов, необходимо провести оценку статистической значимости их различия.

3. Определение статистической достоверности различий

В статистическом анализе принято считать проявленную закономерность статистически достоверной в случаях, когда эмпирический уровень значимости меньше общепринятого критического значения 0,05 (5%) [1,11]. Для рассматриваемой задачи - оценки статистической достоверности снижения времени прохождения перекрёстка при наличии очереди, необходимо убедиться, что расчётные средние значения времени (таблица 2.1) с точки

зрения статистики, не находятся в одном и том же доверительном интервале, то есть, не представляют одно и то же числовое значение.

В существующих ограничениях наиболее приемлемым является метод для двух связанных выборок – параметрический t-критерий Стьюдента, позволяющий сравнить каждую пару из четырёх вычисленных значений времени. Или же параметрический метод для нескольких связанных выборок (>2) – дисперсионный анализ с повторными измерениями, позволяющий оценить различия сразу между всеми четырьмя значениями. Конечно же, больший интерес представляет подробный анализ всех пар значений времени, поэтому останавливаем выбор на первом методе.

Вычисляемая статистика по t-критерию Стьюдента определяется следующим образом:

$$t = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} \quad (7)$$

где \bar{x}_1, \bar{x}_2 – математическое ожидание для двух выборок;

μ_1, μ_2 – оценки средних значений двух выборок (предполагается $\mu_1 = \mu_2$);

$(S_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2})$ – нормирующая база, формируемая из оценок дисперсий S этих равновеликих выборок ($n_1 = n_2 = n = 128$), по стандартному правилу

$$S_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\frac{1}{n}(S_1^2 + S_2^2)} \quad (8)$$

По вычисленным значениям этой статистики определены эмпирические уровни значимости для всех пар средних значений времени (таблица 2.1), которые представлены, совместно с парными коэффициентами корреляций Пирсона, в сводной таблице 2.2.

Сравнивая расчётные значения ошибки (в таблице 2.2 это выделенные ячейки «Оценка различия») с допустимым уровнем в 5% ($5,00E-2$), следует вывод – все пары средних значений времени прохождения перекрёстка (таблица 2.1) значимо различаются между собой. То есть с точки зрения статистики – различия между ними статистически достоверны.

Таблица 2.2 – Значимости парных связей для оценки различий и корреляций

		Первый О	Последний О	Первый БО	Последний БО
Первый в Очереди	Корреляция Пирсона	1			
	Знч.(2-сторон) N	N=128			
Последний в Очереди	Корреляция Пирсона	,233 ^{***}	1		
	Знч.(2-сторон) Оценка различия	,008 1,170E-20	N=128		
Первый без Остановки	Корреляция Пирсона	,169	,360 ^{**}	1	
	Знч.(2-сторон) Оценка различия	,056 3,031E-28	,000 2,066E-08	N=128	
Последний без Остановки	Корреляция Пирсона	,073	,236 ^{***}	,171	1
	Знч.(2-сторон) Оценка различия	,414 3,097E-50	,007 3,308E-38	,054 2,084E-16	N=128

Для дополнительного подтверждения правомочности полученного результата, определены парные коэффициенты корреляции и соответствующие им уровни статистической достоверности (таблица 2.2). Все связи относятся к уровням слабых и очень слабых связей, что подтверждает отсутствие скрытых закономерностей в эмпирических данных, которые могли бы внести искажения в результаты проведённого анализа.

Как вывод по проведённому исследованию можно констатировать следующее – в результате анализа данных на исследуемом перекрестке выявлено, что время прохождения перекрёстка транспортными средствами категорий М1 и М2 статистически достоверно снижается до 58% при наличии очереди. Этот факт следует учесть при организации автоматизированной системы управления регулируемым движением как на данном перекрёстке, так и в пределах транспортной сети большего масштаба.

2.3. Классификация узлов регулируемой транспортной сети города

В этом разделе рассматривается методология анализа сходств/различий для многих перекрестков транспортной дорожной системы г. Челябинска и её применение для 20 узлов регулируемой сети. Результаты весьма информативны для последующей организации автоматизированной системы управления транспортными потоками в городе.

Исследования проводились на основе данных, полученных для 20 наиболее важных перекрестков города Челябинска. Всего было сделано 597 наблюдений, что свидетельствует о репрезентативности выборки. Данные, полученные для исследования с видеокамер, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные параметры массива исходных данных

№	Перекрёсток	Направление	Длит. такта	День, время	Кол-во набл.	Название Пркр
1	Артиллерийская – 1й Пятилетки	На 3W	42	13.10.2019; 11:00	30	Art-1Pt_E
2	Бейвеля – Головицкого	На N	55	08.10.2019; 08:41	27	Bvl-Gol_S
3	Бр. Кашириных – Косорева	На N	38	11.10.2019; 07:16	30	Brk-Kos_S
4	Братьев Кашириных-Салавата Юлаева	На N	30	10.10.2019; 08:00	30	Brk-Sal_S
5	Братьев кашириных-Чичерина	на N	44	08.10.2019; 08:00	9	Brk-Chi_S
6	Чичерина-Братьев Кашириных	На N	44	08.10.2019; 08:00	16	Chi-Brk_N
7	Ленина-Энгельса	На запад	42	28.04.2020; 08:31	33	Len-Eng_E
8	Победы – Коосарева	На E	50	19.10.2019; 09:15	30	Pob-Kos_W
9	250 лет Челябинск – Салавата Юлаева	На 2E	44	30.04.2020; 08:07	36	250-Sal_W
10	Победы – Чичерина	На 3N	42	07:01	36	Pob-Chi_S
11	Победы – Молодогвардейцев	На 2E	42	28.04.2020; 08:00	31	Pob-Mol_W
12	Комсомольский – Ворошилова	2W	42	30.04.2020; 09:01	43	Kom-Vor_E
13	Комсомольский – Свердловский	На 2S	37	30.04.2020; 17:01	30	Kom-Svr_N
14	Комсомольский – 40 лет Победы	К Молдвской	60	09:06	30	Kom-40l_W
15	Комсомольский – 40 лет Победы	К 40 лет Победы	40	09:00	30	Kom-40l_N
16	250 лет Челябинску – Салавата Юлаева	Севера на юг 2N	51	28.04.2020; 08:08	31	250-Sal_N
17	Комарова – Салютная	На 2N	40	27.04.2020; 08:03	31	Kmr-Slt_S
18	Калинина – Кирова	с запада на восток	42	09:00	30	Kal-kir_W
19	Гагарина – Руставели	На 2S	64	30.04.2020; 08:00	30	Gag-Rus_N
20	Победы – Молодогвардейцев	На 2N	27	29.04.2020; 07:00	37	Pob-Mol_S

В исходных данных удалены наблюдения с транспортными средствами, которые являются типичными выбросами. Также удалена часть данных, которые отсутствуют в сущности самого понятия - “структура очереди”.

Для проведения предварительного сравнения перекрестков были рассчитаны средние временные значения 4 параметров для транспортных средств:

а) V1 - Och01: время прохождения перекрестка ТС, стоящим первым в очереди;

б) V2 – OchN: время пересечения перекрестка последним в очереди ТС;

в) V3 - Ost01: время пересечения перекрестка ТС, проезжающим первым без остановки в очереди;

г) V4 – OstN: время прохождения перекрестка ТС, проезжающим последним без остановки в очереди.

Расчетные средние значения выбранных переменных представлены в таблице 2.4, графическое сравнительное их изображение – на рисунке 2.5.

Таблица 2.4 – Средние значения времени прохождения различных перекрёстков

Prkr	Och01, с.	OchN, с.	Ost01, с.	OstN, с.
1	5,300	4,333	4,000	2,556
2	5,591	5,053	4,762	3,364
3	7,821	5,286	5,318	4,091
4	7,167	5,926	4,842	3,542
5	6,667	5,444	4,500	3,429
6	6,750	5,688	5,000	3,357
7	4,563	4,000	3,893	3,407
8	6,100	4,167	3,467	2,433
9	2,833	2,444	2,211	1,750
10	8,086	10,676	10,700	7,211
11	4,167	3,414	3,182	2,267
12	1,905	1,690	1,619	1,561
13	6,200	5,276	6,111	4,333
14	2,733	2,700	2,296	1,700
15	2,767	2,633	2,714	2,211
16	2,267	2,037	1,667	1,345
17	2,158	1,500	1,286	0,929
18	5,621	6,579	5,700	4,333
19	2,103	2,280	2,313	1,474
20	10,818	10,875	8,667	8,000

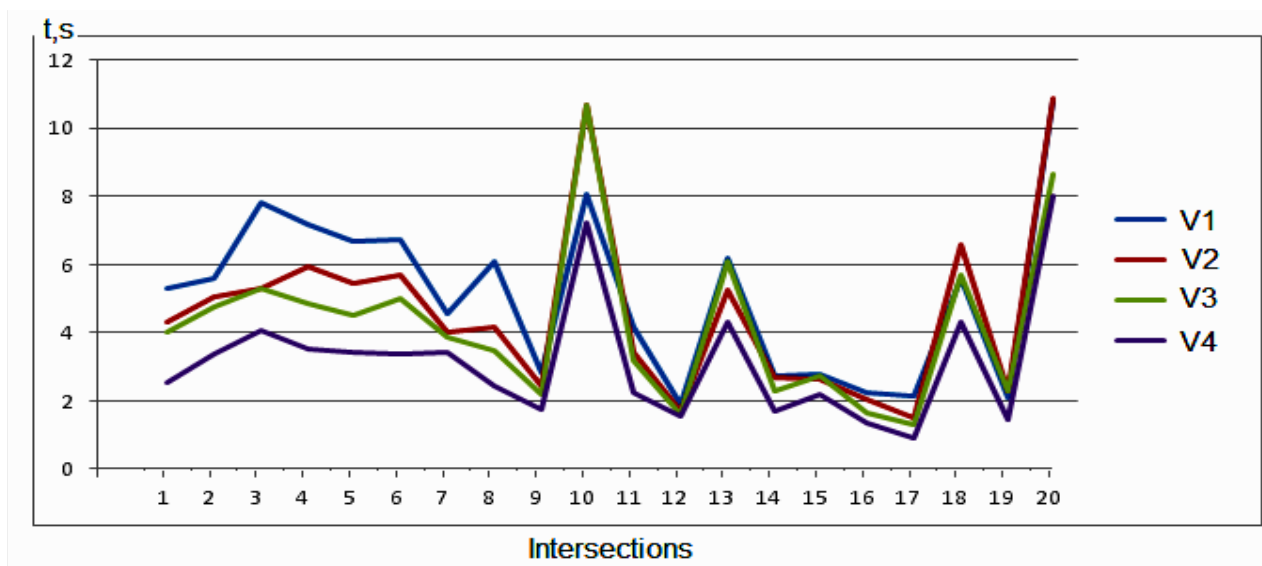


Рисунок 2.5 – Эмпирические данные о времени прохождения перекрёстка

Визуально наблюдается высокая согласованность в пересечении транспортными средствами множества анализируемых перекрестков. Это подтверждается статистическим анализом взаимосвязей между наблюдаемыми временными значениями, показывающими статистическую достоверность высоких корреляций даже при уровне значимости 1% (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Средние значения времени прохождения различных перекрёстков

		Och01	OchN	Ost01	OstN
Och01	Корреляция Пирсона	1	,932**	,909**	,901**
	Знч.(2-сторон)		,000	,000	,000
	N	20	20	20	20
OchN	Корреляция Пирсона	,932**	1	,978**	,978**
	Знч.(2-сторон)	,000		,000	,000
	N	20	20	20	20
Ost01	Корреляция Пирсона	,909**	,978**	1	,978**
	Знч.(2-сторон)	,000	,000		,000
	N	20	20	20	20
OstN	Корреляция Пирсона	,901**	,978**	,978**	1
	Знч.(2-сторон)	,000	,000	,000	
	N	20	20	20	20

Сравнение самих перекрестков по среднему времени их прохождения транспортными средствами представлено ниже на графике (рисунок 2.6). Здесь явно просматривается группировка перекрестков по характеру их про-

хождения транспортными средствами, что и является целью дальнейших исследований.

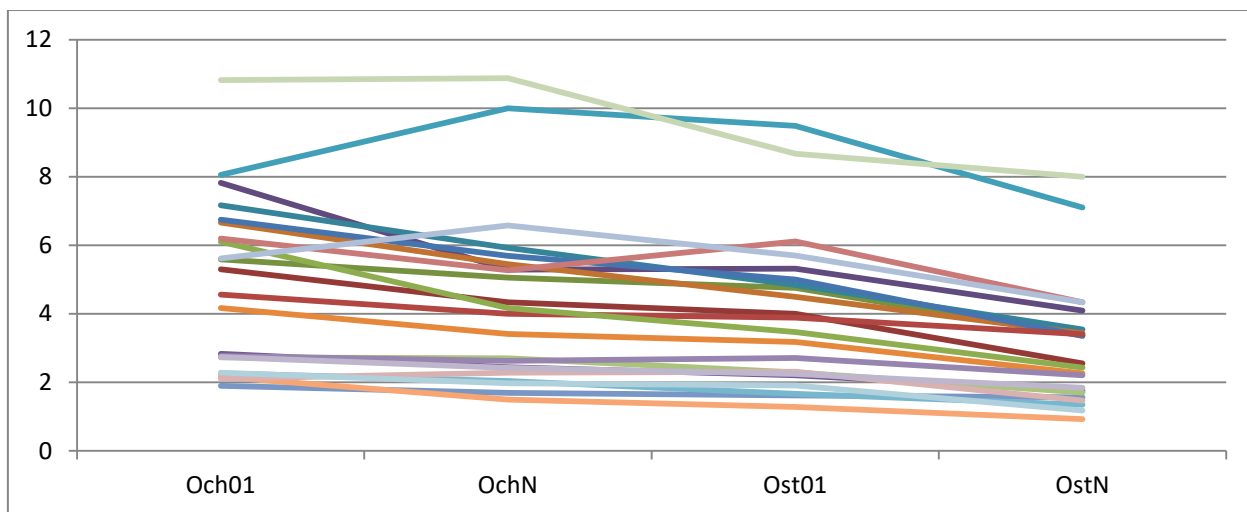


Рисунок 2.6 – Графики времени прохождения различных перекрёстков

Для статистического подтверждения достоверности результатов исследования по сходствам-различиям выбранных двадцати пересечений мы используем непараметрический метод исследования - "тест Фридмана" с дополнительной проверкой согласованности данных - "W-тест Кендалла на согласованность" [1].

1) По критерию Фридмана следует: существует статистически значимая разница между перекрестками по времени их прохождения транспортными средствами на уровне менее 0, 1% (таблица 7).

Таблица 2.6 – Критерии теста Фридмана

Статистики критерия ^а	
N	22
Chi-квadrat	51,873
ст.св.	3
Асимпт. знч.	,000

а. Критерий Фридмана

2) По критерию W-Кендалла следует: под коэффициентом конкордации Кендалла понимается коэффициент множественной корреляции (коэффици-

ент детерминации) между 4 параметрами времени пересечения транспортных средств (таблица 2.7). Это значение (0,786) относится к уровню “очень высокой” корреляции. Поэтому в исходных данных наблюдается высокий уровень одинакового характера прохождения перекрестков транспортными средствами.

Таблица 2.7 – Критерии теста Фридмана

Статистики критерия

N	22
Статистика W Кендалла^a	,786
Хи-квадрат	51,873
ст.св.	3
Асимпт. знч.	,000

a. Коэффициент конкордации Кендалла

На основании результатов проведенного анализа можно сделать выводы относительно различия / сходства пересечений:

- 1) характер пересечения различных перекрёстков – одного и того же типа;
- 2) различие времени движения транспортных средств на различных перекрестках является существенной, т.е. – статистически значимой.

Поэтому необходимы дальнейшие исследования для выявления однородных групп пересечений (по характеру их прохождения транспортными средствами).

Для этого применим метод кластерного анализа со следующими настройками:

- а) меры расстояния между объектами – квадрат евклидова расстояния;
- б) меры расстояния между кластерами – метод Варда.

Результаты кластеризации отражены в дендрограмме на рисунке 2.7.

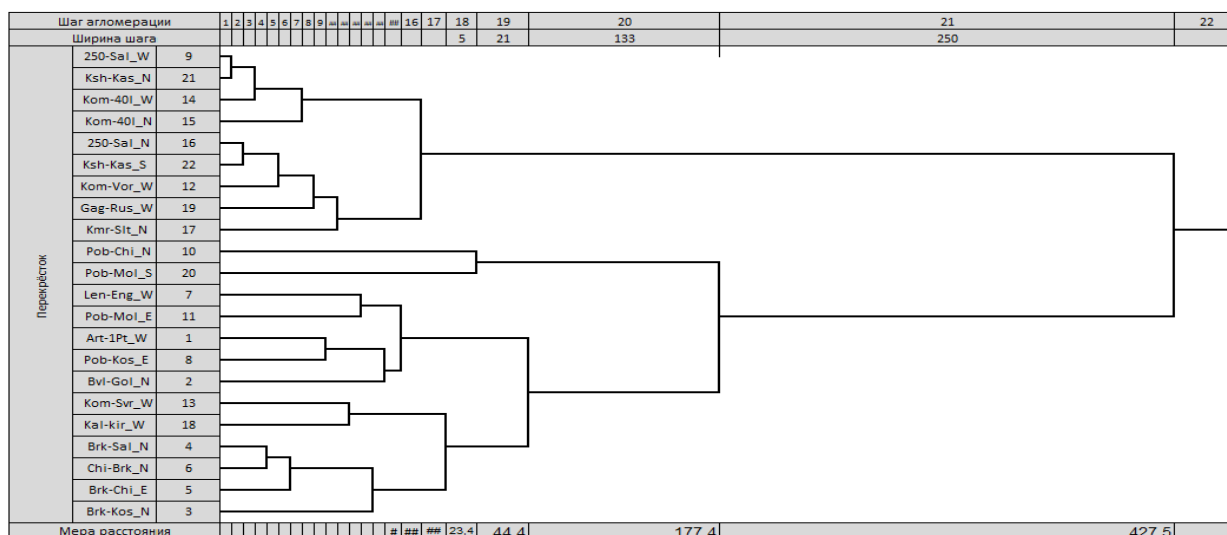


Рисунок 2.7 – Дендрограмма, отражающая порядок группировки перекрёстков

Из дендрограммы следует устойчивое разделение 20 перекрёстков на 3 группы (кластеры):

- а) 1 кластер: 7 перекрестков 9,14,15,19,12,16,17;
- б) 2 кластер: 11 перекрестков 7,11,1,8,2,13,18,4,6,5,3;
- в) 3 кластер: 2 перекрестка 10,20.

Дальнейший анализ различий между группами проведём для этих трех групп. Сравнение выявленных кластеров проводится по методу "сравнение средних". Полученные результаты сравнения представлены в таблице 8.

Таблица 2.8 – Сравнение средних для времени прохождения групп перекрёстков

Ward Method		Och01	OchN	Ost01	OstN
1 кластер	Среднее	5,99518	5,01509	4,61591	3,37382
2 кластер	Среднее	2,42111	2,18600	2,02911	1,55500
3 кластер	Среднее	9,43700	10,43750	9,07350	7,55250
Итого	Среднее	4,84595	4,35068	3,96291	3,00964
Sig. (2-tailed) ANOVA		0.000	0.000	0.000	0.000

Результаты расчетов показывают статистическую значимость различий в прохождении перекрёстков выделенных трех групп – проявляется для всех четырех фиксированных временных параметров на уровне менее 0,1% (пара-

метр *Sig.*, вычисленный по критерию *ANOVA*). Это подтверждает правомерность деления исследуемых перекрестков именно на три кластера.

В качестве основного вывода по этому исследованию следует отметить следующее. Выявление однородных групп перекрёстков в транспортной сети города Челябинска позволяет выработать небольшой набор типовых методов организации и управления светофорной транспортной сетью города – на основе подобию транспортных пересечений дорог.

Это, в конечном итоге, приведёт как к сокращению затрат по отношению к индивидуальному автономному управлению каждым узлом транспортной сети города, так и повысит качество разрабатываемых алгоритмов управления за счёт получения более адекватных математических моделей, в частности – уравнений дорожного движения типа (4).

2.4. Выводы по второй главе

Во второй главе рассмотрены частные подходы к наполнению «Блока автономных исследований» в общей схеме системы управления транспортными потоками (рисунок 1.1).

Предложена методика получения уравнения дорожного движения на примере исходных данных с 25 перекрёстков транспортной сети города Челябинска. Эта математическая модель, как уравнение дорожного движения, получена в виде линейного уравнения регрессии, связывающего 20 фиксируемых с видеокамер параметров анализируемых перекрёстков. Далее, в целях практического применения такой модели, она была упрощена до рабочего состояния без потери допустимого качества – оставлены только восемь наиболее важных геометрических параметров перекрёстка, а также потоки пешеходов.

Также освещены исследования по характеру прохождения транспортными средствами различных перекрёстков. Откуда следует, что время прохождения перекрёстка транспортными средствами категорий М1 и М2 статистически достоверно снижается до 58% при наличии очереди. Этот факт сле-

дует учесть при организации автоматизированной системы управления регулируемым движением как на данном перекрёстке, так и в пределах транспортной сети большего масштаба.

В завершении, проведена классификация перекрёстков по схожести их прохождения транспортными средствами. Выявление однородных групп перекрёстков в транспортной сети города Челябинска позволяет выработать минимальный набор типовых методов организации и управления светофорной транспортной сетью города – на основе подобию транспортных пересечений дорог.

Рассмотренные методики и примеры конкретных результатов исследований позволят повысить качество разрабатываемых алгоритмов управления транспортной сетью любого масштаба за счёт получения более адекватных математических моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассматривается проблема управления транспортными потоками с привлечением современных средств контроля – видеорегистраторов и видеокамер, работающих в онлайн-режиме. Современный подход в данном направлении характеризуется следующим – это организация безопасности городской сети дорожного движения и его оптимизация посредством управления объектами светофорного регулирования.

В первой главе рассматривается ряд различных современных подходов к моделированию и исследованию транспортных потоков:

- а) решение вопроса разрешимости проблем затора в транспортной сети;
- б) организация автоматизированных систем управления транспортными потоками с применением видеокамер в онлайн-режиме;
- в) методы, предполагающие статистическую обработку информации о транспортных потоках.

Для этого были проработаны тематические первоисточники как Российских научных школ, так и зарубежных авторских направлений. Также проявлена общая схема системы управления транспортными потоками, являющаяся методологической основой для дальнейших исследований (рисунок 1.1).

Во второй главе рассмотрены частные подходы к наполнению «Блока автономных исследований» этой схемы в части аналитики и управления.

Во-первых, предложена методика получения уравнения дорожного движения на примере исходных данных с 25 перекрёстков транспортной сети города Челябинска. Эта математическая модель, как уравнение дорожного движения, получена в виде линейного уравнения регрессии, связывающего 20 фиксируемых с видеокамер параметров анализируемых перекрёстков. Далее, в целях практического применения такой модели, она была упрощена до рабочего состояния без потери допустимого качества – оставлены только восемь наиболее важных геометрических параметров перекрёстка, а также потоки пешеходов. Данная модель в таком статическом виде предполагает её последующее применение в более динамичных исследованиях, как например,

имитационном моделировании динамики транспортных потоков на регулируемом перекрёстке.

Также освещены исследования по характеру прохождения транспортными средствами различных перекрёстков. Откуда следует, что время прохождения перекрёстка транспортными средствами категорий М1 и М2 статистически достоверно снижается до 58% при наличии очереди. Этот факт следует учесть при организации автоматизированной системы управления регулируемым движением как на данном перекрёстке, так и в пределах транспортной сети большего масштаба.

В завершении, проведена классификация перекрёстков по схожести их прохождения транспортными средствами. Выявление однородных групп перекрёстков в транспортной сети города Челябинска позволяет выработать минимальный набор типовых методов организации и управления светофорной транспортной сетью города – на основе подобию транспортных пересечений дорог.

Рассмотренные методики и примеры конкретных результатов исследований позволят повысить качество разрабатываемых алгоритмов управления транспортной сетью любого масштаба за счёт получения более адекватных математических моделей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бююль, Ахим. SPSS: искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей : [пер. с нем.] / Ахим Бююль, Петер Цёфель; под ред. В.Е. Момота. - М.: DiaSoft, 2005. - 608 с.: ил.

2. Введение в математическое моделирование транспортных потоков: учеб. пособие / А.В. Гасников, С.Л. Кленов, Е.А. Нурминский и др.; под ред. А.В. Гасникова. – М.: МФТИ, 2010. – 362 с.

3. Загребина, С.А. Начально-конечные задачи для неклассических моделей математической физики / С.А. Загребина // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – Челябинск, 2013. – Т.2, № 6. – С. 5-24.

4. Каталевский, Д.Ю. Основы имитационного моделирования и системного анализа в управлении: учебное пособие / Д.Ю. Каталевский. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2015. – 496 с., ил.

5. Кобелев, Н.Б. Теория глобальных систем и их имитационное управление: Монография / Н.Б. Кобелев. – М.: ИНФРА-М, 2014. – 278 с.: ил.

6. Конкина, А.С. Аналитическое и численное исследование гидродинамических моделей с многоточечным начально-конечным условием: диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук / А.С. Конкина. – Челябинск, 2019. – 118 с.

7. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Организация дорожного движения на регулируемых перекрёстках. – М.: Мин-во транспорта, 2017. – 91 с.

8. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Методы успокоения движения. – М.: Мин-во транспорта, 2017. – 75 с.

9. Свиридюк, Г.А. Уравнения соболевского типа на графах / Г.А. Свиридюк // Неклассические уравнения математической физики: сб. науч. работ. – Новосибирск, 2002. – С. 221-225.

10. Снетков, Н.Н. Имитационное моделирование экономических процессов: Учебно-практическое пособие / Н.Н. Снетков. – М.: Изд. центр ЕАОИ, 2008. – 228 с.
11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере: учебное пособие / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – М.: МЦНМО, 2016. – 368 с., ил.
12. Bakibillah, A. S. M., Hasan, M., Rahman, M. M., & Kamal, M. A. S. (2019). Predictive car-following scheme for improving traffic flows on urban road networks. *Control Theory and Technology*, 17(4), 325-334. doi:10.1007/s11768-019-9144-z
13. Biswas, D.; Su, H.; Wang, C.; Blankenship, J.; Stevanovic, A. An Automatic Car Counting System Using OverFeat Framework. *Sensors (Basel)*. 2017 July; 17(7): 1535. Published online 2017 June 30. doi: 10.3390/s17071535.
14. Buch, N.; Velastin, S.A.; Orwell, J. A review of computer vision techniques for the analysis of urban traffic. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2011; 12:920–939. doi: 10.1109/TITS.2011.2119372.
15. Gandhi, R. R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN, YOLO—Object Detection Algorithms. July 9, 2018. <https://towardsdatascience.com/r-cnn-fast-r-cnn-faster-r-cnn-yolo-object-detection-algorithms-36d53571365e>.
16. Genders, W., & Razavi, S. (2020). Policy analysis of adaptive traffic signal control using reinforcement learning. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 34(1) doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000859.
17. Kazhaev, A., Almetova, Z., Shepelev, V., & Shubenkova, K. (2018). Modelling urban route transport network parameters with traffic, demand and infrastructural limitations being considered. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 177(1) doi:10.1088/1755-1315/177/1/012018 Retrieved from www.scopus.com.
18. Kikuzawa, M., & Jeong, M. (2019). Development of traffic flow measurement system using fixed point cameras. Paper presented at the ACM International Conference Proceeding Series, 79-83. doi:10.1145/3314527.3314542 Retrieved from www.scopus.com.

19. Mishra, P.; Banerjee, B. Multiple kernel based KNN classifiers for vehicle classification, *International Journal of Computer Applications*, vol. 71, no. 6, 2013.
20. Shepelev, V., Aliukov, S., Nikolskaya, K., Das, A., Slobodin, I. The Use of Multi-Sensor Video Surveillance System to Assess the Capacity of the Road Network (2020) *Transport and Telecommunication*, 21 (1), pp. 15-31. DOI: 10.2478/ttj-2020-0002
21. Treiber, M., & Kesting, A. (2013). Traffic flow dynamics: Data, models and simulation. *Traffic flow dynamics: Data, models and simulation* (pp. 1-503) doi:10.1007/978-3-642-32460-4 Retrieved from www.scopus.com.
22. Tubaishat, M., Qi, Q., Shang, Y., & Shi, H. (2008). Wireless sensor-based traffic light control. Paper presented at the 2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2008, 702-706. doi:10.1109/ccnc08.2007.161 Retrieved from www.scopus.com
23. Wang, P., Jiang, Y., Xiao, L., Zhao, Y., & Li, Y. (2020). A joint control model for connected vehicle platoon and arterial signal coordination. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 24(1), 81-92. doi:10.1080/15472450.2019.1579093
24. Wu, L., Ci, Y., Wang, Y., & Chen, P. (2020). Fuel consumption at the oversaturated signalized intersection considering queue effects: A case study in harbin, china. *Energy*, 192 doi:10.1016/j.energy.2019.116654
25. Zhang S, Wu G, Costeira JP, Moura JM. Table of contents. In: 2017 IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR). vol. 2017-Jan, 2017, p. v–liii. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.4>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/8099487/>.
26. Zhou, Y.; Nejati, H.; Do, T.; Cheung, N.; Cheah, L. Image-based Vehicle Analysis using Deep Neural Network: A Systematic Study. Available online: <https://arxiv.org/pdf/1601.01145.pdf> (accessed on 05 May 2019).
27. Shepelev, V.; Glushkov, A.; Almetova, Z. and Mavrin, V. (2020). A Study of the Travel Time of Intersections by Vehicles using Computer Vision.

In Proceedings of the 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems - Volume 1: iMLTrans, ISBN 978-989-758-419-0, pages 653-658. DOI: 10.5220/0009806206530658

28. Видеонаблюдение // Интерсвязь-2020, доступ: <https://cams.is74.ru/live> (дата обращения – 12 ноября 2019).

29. Категории транспортных средств – М, N, O, L // Автоблог: АвтомирРФ.ru, доступ: – <https://avtomirrf.ru/kategorii-ts.html> (дата обращения – 05 марта 2020).

30. Умный город // Дорожная карта реализации пилотного проекта по цифровизации городского хозяйства города Челябинска, доступ: <http://mininform74.ru/htmlpages/Show/activities/Umnyjgorod> (дата обращения – 04 апреля 2020).