

На правах рукописи

КУЗИН МИХАИЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ
ПОТОКОВ ПРИ КООРДИНИРОВАННОМ РЕЖИМЕ
УПРАВЛЕНИЯ**

05.13.18 - Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2011

Работа выполнена на кафедре кибернетики в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Гуц Александр Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Шапцев Валерий Алексеевич

доктор технических наук, профессор
Филимонов Вячеслав Аркадьевич

Ведущая организация: Сибирский федеральный университет

Защита диссертации состоится 27 мая 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.14 при Тюменском государственном университете по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская 15А, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан «___» апреля 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ступников А.А.

- конференции(с международным участием). Оренбург: Изд-во ОГУ, 2008. С.76-78.
- Кузин М.В. Имитационная модель координированных транспортных потоков в дорожной сети города // Информационные технологии моделирования и управления. 2009. №4(56). С.502-508.
 - Кузин М.В. Имитационное моделирование неоднородного транспортного потока на различных участках городской транспортной сети. // Всероссийская научно-техническая конференция Проблемы информатики в образовании, управлении экономике и технике: сборник статей. Пенза: 2008. С.233-235.
 - Кузин М.В. Имитационная модель координированных транспортных потоков для адаптивной системы управления дорожным движением.// Информационные технологии и автоматизация управления, материалы межвузовской научно-практической конференции. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2009. С.192-194.
 - Кузин М.В. Особенности имитационного моделирования «просачивающихся» лево-поворотных транспортных потоков в крупных городских сетях. // Информационно-вычислительные технологии и приложения, сборник статей IX международной научно-технической конференции. Пенза: 2008. С.151-154.
 - Кузин М.В. Особенности моделирования движения плотных групп транспортных средств с учетом изменения поперечного сечения дороги // Математические структуры и моделирование. Омск: Изд-во ОмГУ, 2008. №18. С. 43-46.
 - Кузин М.В. Программное обеспечение для имитационного моделирования координированных транспортных потоков. // Материалы международной научной конференции «Инновации в обществе технике и культуре» часть 3. Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ. 2008. С.27-31.
 - Кузин М.В. Программное обеспечение для моделирования координированного управления транспортными потоками // Математические структуры и моделирование. Омск: Изд-во ОмГУ, 2008. №18. С.46-51.
 - Кузин М.В. Свидетельство об отраслевой регистрации разработки №12185 «Программа расчета и оптимизации режимов координированного управления дорожным движением в городах «ПРОСПЕКТ 1.0» 22.01.2009. Отраслевой фонд алгоритмов и программ. 2009.

6. Проведено сравнение результатов моделирования с реальной дорожной ситуацией в подрайоне АСУДД города Красноярска по ул. Мира. Данные по режимам управления, схемы организации движения и измерения характеристик потока были представлены фирмой ЗАО Автоматика – Д (г. Омск), занимающейся наладкой АСУДД в городе Красноярске. В результате моделирования были выявлены «проблемные» перекрестки и направления движения, в которых наблюдались заторы и предзаторные состояния. Значения характеристик качества управления, полученные экспериментально и с помощью модели оказались очень близки. Что позволяет говорить о достаточной адекватности модели для задач управления.
7. Экспериментально оценена эффективность введения новых элементов дорожно-транспортной сети, с точки зрения суммарной транспортной задержки, по сравнению с моделью прототипом. Введение некоторых элементов дают до 25% выигрыша, в среднем значение целевой функции было на 10%-11% меньше.
8. В настоящее время программное обеспечение, реализованное на базе данной модели, используется инженерами фирмы для расчета параметров управления движения в таких городах, как Воронеж, Хабаровск, Красноярск, Ижевск и других. Программное обеспечение «Программа расчета и оптимизации сигнальных планов «ПРОСПЕКТ 1.0» зарегистрирована в федеральном отраслевом фонде алгоритмов и программ свидетельство № 12185, номер государственной регистрации 50200900210.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

В изданиях рекомендованных экспертным советом ВАК:

1. Кузин М.В. Имитационное моделирование координированных транспортных потоков // Системы управления и информационные технологии (перспективные исследования). 2010. №1.1(39). С.152-155.

В других изданиях:

2. Кузин М.В. Задержки транспортных средств при уменьшении поперечного сечения дороги в задаче моделирования координированного движения транспортного потока. // Современные информационные технологии в науке образовании и практике, Материалы VII всероссийской научно-практической

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Безопасность дорожного движения и эффективность автомобильных перевозок в значительной мере определяются качеством организации дорожного движения (ОДД), в основу которой входит управление транспортными и пешеходными потоками. Незнание природы их и характера ограничивает возможности планирования рациональных мероприятий по организации дорожного движения, их оптимизации и оперативной коррекции в соответствии с изменившимися условиями. В крупных городах данная проблема приобретает особую остроту. Ситуация усложняется такими тенденциями, как постоянно возрастающая мобильность населения, уменьшение перевозок общественным транспортом и увеличение перевозок личным транспортом, нарастающий разрыв между увеличением количества автомобилей и протяженностью улично-дорожной сети (УДС), не рассчитанной на современные транспортные потоки (ТП).

Для поиска эффективных стратегий управления транспортными потоками в мегаполисе, оптимальных решений по проектированию улично-дорожной сети и организации дорожного движения необходимо учитывать широкий спектр характеристик транспортного потока, закономерности влияния внешних и внутренних факторов на динамические характеристики смешанного транспортного потока. Применение моделирования и создания адекватной модели транспортного потока является актуальной задачей в процессе организации и управления дорожным движением.

Цель работы – разработка адекватного современным условиям дорожного движения метода имитационного моделирования координированных транспортных потоков в городской дорожной сети и разработка необходимой для достижения поставленной цели системы компьютерного моделирования.

Объект исследования: поведение транспортного потока при координированном режиме управления дорожным движением.

Предмет исследования: математическое описание влияния различных характеристик среды, в которой двигаются транспортные потоки, взаимное влияние транспортных потоков друг на друга в конфликтных ситуациях, поиск характеристики и методика ее вычисления, как показателя устойчивости параметров управления координированного транспортного потока к случайным колебаниям интенсивности.

В работе были решены следующие задачи

1. Разработан новый метод имитационного моделирования координированных транспортных потоков в городской дорожной сети.
2. Реализован учет влияния «среды», в которой двигаются потоки.
3. Реализован учет физической длины очереди.
4. Разработан необходимый аппарат для моделирования нерегулируемых пересечений, левых поворотов на регулируемых перекрестках.
5. Введена новая характеристика, которая позволяет оценить качество параметров управления.
6. Проведена проверка адекватности разработанных формул реальным дорожным условиям и применимости их для компьютерного моделирования и поиска оптимальных параметров управления.
7. Создана компьютерная программа, реализующая разработанный метод моделирования координированных транспортных потоков.

Методика исследований: носит комплексный характер и содержит как теоретические, так и экспериментальные исследования.

Задачами теоретических исследований являлось выявление основных закономерностей поведения транспортного потока на различных элементах транспортной сети города, методика расчета различных характеристик качества управления транспортным потоком.

Задачами экспериментальных исследований являлось определение численных параметров математической модели, подтверждение эффективности предложенного имитационного метода координированных транспортных потоков, подтверждение действенности предложенных рекомендаций.

Научная новизна: в работе предложен новый метод имитационного моделирования координированных транспортных потоков в городской дорожной сети, основанный на введении в рассмотрение новых функциональных элементов транспортной сети: сужение проезжей части и просачивание одного транспортного потока через другой на нерегулируемом пересечении или на регулируемом, но двигающиеся в одну фазу.

Предложены формулы преобразования функции интенсивности транспортного потока на этих элементах. Произведен сбор данных для проверки формулы просачивающихся потоков и корректировки ее параметров. Учет физической длины очереди при сужениях магистрали и на пересечениях позволил обнаруживать «каскадные заторы», когда очередь на одном перекрестке блокирует движение на соседних.

Третьим этапом стало построение уравнения или системы уравнений, которая отображает зависимость функции каждого выходящего потока из сети от некоторого множества функций входящих потоков.

Построение такой структуры модели транспортного потока, позволило проводить различные уточнения работы модели на втором и третьем уровнях, используя работы других авторов либо собственные исследования. Такие как введение новых функциональных элементов, просачивание на нерегулируемом пересечении, сужение магистрали и т.д., введение параметров описывающих влияние внешней среды на поток.

В данной работе полученные следующие основные результаты

1. Разработан имитационный метод моделирования движения транспортных потоков в городской дорожной сети при координированном режиме управления.
2. Введены в рассмотрение новые функциональные элементы транспортной сети: сужение проезжей части и просачивание одного транспортного потока через другой на нерегулируемом пересечении или на регулируемом, но двигающиеся в одну фазу.
3. Предложены формулы преобразования функции интенсивности транспортного потока на этих элементах. Произведен сбор данных для проверки формулы просачивающихся потоков и корректировки ее параметров. Учет физической длины очереди при сужениях магистрали и на пересечениях позволил обнаруживать «каскадные заторы», когда очередь на одном перекрестке блокирует движение на соседних.
4. С учетом принципов работы этих элементов предложены формулы расчета транспортной задержки в соответствующих местах дорожной сети.
5. Введено понятие устойчивости параметров управления к случайным колебаниям функции интенсивности и предложена методика расчета этой величины для всей сети. В модели использовалась характеристика качества параметров управления уже зарекомендовавшая себя на практике - величина транспортной задержки или количество времени, которое затрачивают все транспортные средства в результате остановки, на каком-либо элементе транспортной сети. Совместное использование этих двух показателей качества управления потоком позволит инженерам технологам или АСУДД принимать более точные решения с целью минимизации транспортных задержек и количества заторов.

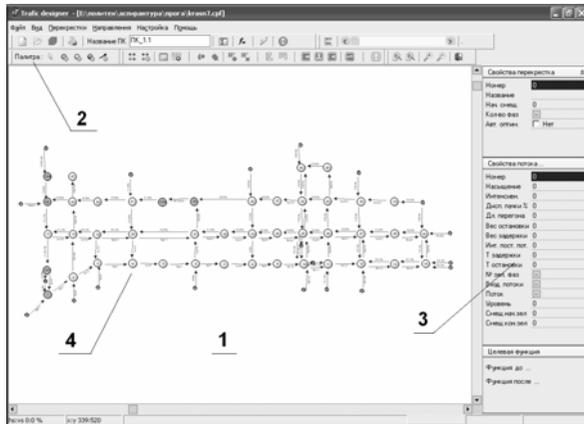


Рис. 7. Главное окно программы

В программе имеется возможность создавать произвольное число маршрутов движения. Как правило, в УДС города существуют несколько таких маршрутов, движение по которым наиболее интенсивно в определенное время, например, в центр города в утренний час пик и из центра в районы в вечерний

Разработанная программа может служить рабочим инструментом для технологов организации дорожного движения, обучающей средой, демонстрирующей основные принципы координированного управления дорожным движением, для студентов соответствующих специальностей, а также средством по дальнейшему исследованию транспортных потоков в городах.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Для получения всех последующих результатов работы базовой задачей была построение математической модели движения транспортных потоков в городской сети при координированном режиме управления. Использовалось несколько уровней отображения модели для более точного понимания процессов, происходящих в транспортной сети.

Первый уровень это рассмотрение потоков в виде графа, где дуги это дороги, а узлы это перекрестки и пересечения.

Второй уровень это разбиение сложных изменений, которые происходят с потоком в узлах и дугах на ряд простых операций или функций преобразования транспортного потока, таких как слияние, разделение, просачивание, проезд стоп линии и т.д.

С учетом принципов работы этих элементов предложены формулы расчета транспортной задержки в соответствующих местах дорожной сети.

Введено понятие устойчивости параметров управления к случайным колебаниям функции интенсивности и предложена методика расчета этой величины для всей сети.

Практическая ценность работы заключается в создании метода имитационной модели координированных транспортных потоков и реализации её в виде программного модуля для внедрения в контур управления адаптивной автоматизированной системы управления дорожным движением (АСУДД), а так же реализации модели в виде специализированного программного обеспечения для расчета параметров управления дорожным движением.

Реализация работы. В настоящее время программное обеспечение, реализованное на базе предложенного метода имитационного моделирования, используется инженерами фирмы ЗАО Автоматика – Д (г. Омск) для расчета параметров управления движения в таких городах, как Воронеж, Хабаровск, Красноярск, Ижевск и др.

На защиту выносятся.

1. Имитационный метод моделирования работы нерегулируемого пересечения, с приоритетом движения одного направления, формула расчета задержки для данного элемента транспортной сети.
2. Метод учета лево-поворотного просачивающегося потока на регулируемом многофазном перекрестке, формула расчета задержки для данного элемента транспортной сети.
3. Метод учета сужения проезжей части и формула расчета задержки для данного элемента транспортной сети.
4. Метод расчета устойчивости параметров управления к случайным колебаниям интенсивности транспортного потока.
5. Программное обеспечение для моделирования координированных транспортных потоков и расчетов планов координации дорожных контроллеров.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из четырех глав основных результатов и выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 111 страниц основного текста, в том числе 8 таблиц, 45 рисунков, список литературы из 75 наименований и приложений на 22 страницах

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ литературных источников по теории транспортных потоков (Сильянов В.В., Дрю Д., Капитанов В.Т., Хилажев Е.Б., Буслаев А.П., Кременец Ю.А., Уизем, Гриншилдс, Даганзо, Робертс). Приведены свойства транспортного потока: динамичность, стационарность, инерционность и стохастичность. Описаны особенности транспортного потока с точки зрения управления, а именно: неполная управляемость - даже при наличии полной информации о потоках и возможности информирования водителей транспортных средств (ТС) о необходимых действиях, эти требования носят рекомендательный характер; множественность критериев качества, таких как: задержка в пути, средняя скорость движения, прогнозируемое число ДТП, объем вредных выбросов в атмосферу и т.д.; практическая невозможность замера даже основных характеристик, определяющих качество управления. Приведена классификация методов моделирования и математических моделей транспортных потоков, рассмотрены основные методы управления и в частности метод координированного управления дорожным движением.

Смысл метода координированного управления сводится к максимальному использованию групповой формы транспортного потока. Именно такой характер движения транспортных средств позволяет светофорной сигнализации обеспечивать пропуск через УДС транспортных потоков средней и высокой интенсивностей. Целью координированного управления является обеспечение движения ТП по УДС с минимальным количеством остановок на перекрестках. Это достигается путем подбора (расчета) моментов включения разрешающего сигнала светофора на смежных перекрестках таким образом, чтобы исключить остановку в зоне действия следующих по маршруту движения светофоров.

Координированное управление влияет на поток, делая функцию интенсивности ТП по всей сети периодичной и уплотняя ТП на регулируемых перекрестках.

Распад или разряжение является естественным свойством транспортного потока, возникающего, если этому потоку нет никаких помех в движении.

Также в первой главе, приводится история создания и развития первой детерминированной модели координированных транспортных потоков TRANSYT, Д. Робертса и ее советского аналога ТРАССА.

Класс *TRoot* является основным классом модели. Его свойства характеризуют общие параметры модели. T_c – время цикла управления, K_i и K_s – коэффициенты интенсивностей и времен проезда по направлениям соответственно, данные коэффициенты позволяют быстро изменить параметры потоков, переводя, например их в зимний режим движения – то есть увеличив все времена проезда (K_s) на всех направлениях на 25%. Класс *TRoot* включает в себя массив объектов класса *TCross* – перекрестки и *TRoute* – маршруты.

Класс *TCross* описывает свойства и методы сущности «Перекресток». Обязательными атрибутами является имя (*Name*) и номер (*Num*) перекрестка. Важный параметр перекрестка – количество фаз (*PhaseCount*), тип перекрестка: обычный, внешний, дополнительная точка. Класс *TCross* включает в себя массив объектов класса *TFlow* – поток.

Класс *TFlow* – поток (направление). Особенностью этого класса является то, что он не только включается в класс *TCross*, но также имеет два атрибута *Owner* и *From* ссылающиеся (пунктирная стрелка) на класс *TCross* в действительности эти ссылки будут идти на разные объекты, направление не может начинаться и заканчиваться на одном перекрестке. Класс *TFlow* может включать в себя массив объектов класса *TinFlow* – входящие в данное направление. Если число элементов данного массива равно нулю, то интенсивность на данном направлении будет постоянной.

Основными методами класса *TFlow* являются *Flow*, *Flow1*, и *Raspad*. Они реализуют следующие операторы: перераспределение интенсивности потока на стоп линии перекрестка, в месте сужения и распад групп автомобилей на перегоне соответственно.

Для реализации маршрутов созданы два дополнительных класса *TRoute* и *TPoint*. Маршрут состоит из произвольного числа смежных перекрестков. Класс *TPoint* указывает на направление участвующее в маршруте, его тип. Главным методом для класса *TRoute* является *CalcRoute()*. Он рассчитывает значение целевой функции для данного маршрута.

Главное окно программы изображено на рисунке 7, 1 – рабочая область для построения графа сети, 2 – палитра компонентов, 3 – панель свойств выбранного объекта. 4 – граф сети перекрестков.

сети, то один из атрибутов сущности flow должен указывать на перекресток, с которого он начинается (обозначено пунктирной стрелкой на рисунке 5).

Потоки (flow) могут быть двух типов постоянные $q(t) = \text{const}$ и потоки состоящие из других потоков. Если у данного потока нет входящих в него других потоков (inflow), то он считается постоянным. Если поток имеет один или несколько входящих в него потоков с других перекрестков, то функция интенсивности $q(t)$ на нем будет зависеть от времени и рассчитываться согласно математической модели описанной в главе 2.

Данная программа разработана на объектно-ориентированном языке высокого уровня Object Pascal, в среде разработки Delphi 7.

На рисунке 6 изображена диаграмма классов модуля реализующего математическую модель. Для каждого класса приведены только основные атрибуты и методы, также на диаграмме отсутствует ряд вспомогательных классов используемых в данной программе.

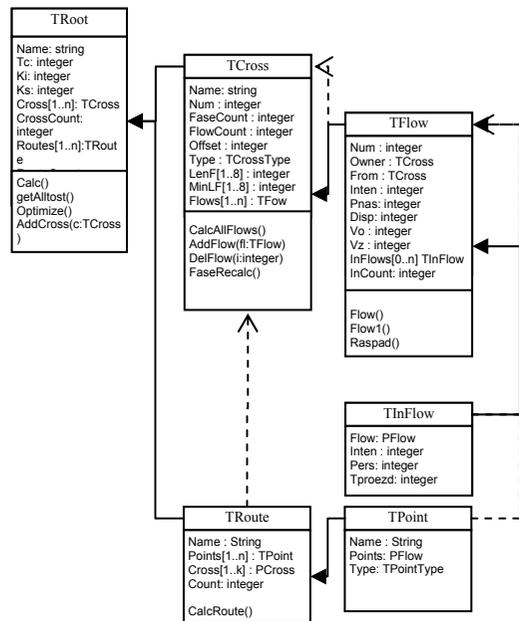


Рис. 6. Диаграмма классов. Основные классы, реализующие модель движения

Главным достоинством модели Д. Робертса было введение понятия распада плотной группы транспортных средств и введение формулы, которая позволяла рассчитать функцию интенсивности транспортного потока на любом удалении от места (времени) начала движения рассматриваемой группы ТС.

Вид типичной диаграммы изменения интенсивности в группе автомобилей в нескольких сечениях магистрали, полученной с помощью модели Робертса, приведен на рис. 1.

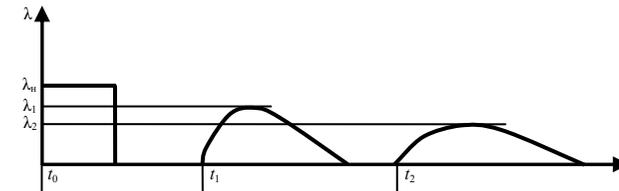


Рис. 1 - Диаграмма изменения интенсивности в группе автомобилей в нескольких сечениях магистрали

В начале движения t_0 поток движется с постоянной интенсивностью λ_n , постепенно по мере движения из-за разности скоростей ТС в группе некоторые из них вырываются вперед, а некоторые отстают, в результате к моменту времени t_1 функция интенсивности становится более гладкой.

Указаны основные недостатки данного подхода:

- Отсутствие учета «среды» по ходу движения потока, сужения расширения и проезжей части т.д.;
- Как следствие этого отсутствует понятие «уплотнение потока» по ходу движения, то есть в модели TRANSYT и ее потомках, группа автомобилей постоянно распадается до следующего перекрестка, не взирая ни на какие помехи впереди (красный сигнал светофора, конец не разъехавшейся очереди на перекрестке, нерегулируемый пешеходный переход и т.д.).
- Так называемая «вертикальная очередь», то есть в данном классе моделей не учитывается физическая длина очереди, скопившейся на перекрестке, автомобили выстраиваются как бы друг на друга. В действительности ситуация очень важна, так как длинные очереди на коротких перегонах часто блокируют конфликтующие с ними потоки, вызывая каскадные заторы.
- Так же в модели TRANSYT, TRANSYT-7F(8C), TPACCA не производится моделирование потоков на нерегулируемых пересечениях, или нерегулируемых конфликтных точках на регулируемом перекрестке (левый поворот).

Во второй главе для более качественного понимания принципов координированного управления, структуры и работы модели основные понятия и обозначения были разделены на три основные группы. К первой относятся непосредственно характеристики самого транспортного потока, ко второй управляющие воздействия, к третьей параметры среды, влияющие на поток.

Характеристики транспортного потока следующие:

- Плотность $\rho(x, t)$ есть число машин занимающих единицу длины дороги, единицы измерения авт./км;
- Функция интенсивности $q(x, t)$ равна числу машин пересекающих черту x за единицу времени;
- интенсивность Q – среднее арифметическое функции интенсивности за определенный промежуток измерений, на практике используются единицы измерения транспортные единицы в час (ТЕ/ч), или автомобили в час (авт/ч).
- Скорость потока V , средняя скорость всех автомобилей в рассматриваемом месте дороги, измеряется в км/ч.
- Среднее время проезда между двумя указанными точками на магистрали - $t_{пр}$, измеряется в секундах.

Параметры среды

Для обеспечения адекватного отражения влияния среды на транспортные потоки в рассматриваемой модели имеются следующие величины: 1) длина перегона измеряется в метрах, обозначается d ; 2) максимальная пропускная способность – C измеряется в автомобилях в час (авт./ч); 3) динамическая пропускная способность (динамический поток насыщения). Это введенное в данной работе понятие, данная величина зависит не только от ширины проезжей части, на эту величину так же влияет значение интенсивности какого либо конфликтующего потока имеющего больший приоритет, чем данный, обозначается как C' , измеряется в авт./ч; 4) зона действия светофора – расстояние, с которого водители видят сигналы светофора, измеряется в метрах, обозначается l .

Управляющие воздействия

Для описания управления ТП в данной работе используются следующие величины и обозначения: длительность цикла управления - T ; длительность запрещающего сигнала - τ ; длительность разрешающего сигнала - g ; время необходимое для разгрузки очереди - a ; смещение начала цикла регулирования на конкретном перекрестке, от общей временной базы – o ; смещение начала разрешающего сигнала - g_b ; смещение конца разрешающего сигнала - g_e ;

оптимизации, но без учета этих элементов. Учет нерегулируемых пересечений не дал значительного прироста эффективности оптимизации (2%-3%), но с точки зрения устойчивости к случайным колебаниям интенсивности показал значительный прирост, в среднем на 90%, те заторы будут происходить в 2 раза реже, чем при управлении, рассчитанном в моделях прототипах.

Четвертая глава посвящена описанию программного комплекса для моделирования координированных транспортных потоков, общей структуре программы описанию основных алгоритмов, форм ввода-вывода данных.

Разработанный проект имеет модульную структуру. Модули, реализующие математическую модель, сервисные функции, функции отображения графической и табличной информации независимы друг от друга и связаны через интерфейсы межмодульного взаимодействия. Это обеспечивает возможность интеграции модулей с другими программами, повышает скорость и качество разработки проекта.

Логическая компоновка объектов транспортной сети выполнена в виде дерева. Корневой пустой элемент (root) содержит в себе несколько объектов типа «перекресток» (cross), каждый перекресток содержит в себе несколько потоков (flow). На рисунке 5 изображено дерево взаимосвязей сущностей элементов УДС.

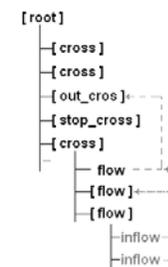


Рис. 5. Дерево логической взаимосвязи сущностей

Сущность root содержит основные свойства, относящиеся ко всей разрабатываемой модели, также она является родительской для сущности перекресток(cross). Перекрестки могут быть различных типов: регулируемый многофазовый перекресток, перекресток с одной зеленой фазой длительностью равной времени цикла, внешний перекресток.

Каждый регулируемый перекресток может включать в себя ряд входящих потоков(flow), так как поток это связь между двумя точками

3. пять регулируемых перекрестков в виде креста, на центральном перекрестке присутствуют четыре лево-поворотных просачивающихся потока, в модели прототипе они заменены на обычные;
4. шесть перекрестков в виде креста, в центре которого, полностью нерегулируемый перекресток(4 нерегулируемые пересечения) с приоритетом проезда по одной магистрали;
5. магистраль из шести перекрестков, на которой присутствует одно сужение, один просачивающийся поток и один вливающийся поток, на нерегулируемом пересечении.

В ходе каждого эксперимента определялась эффективность внедрения того или иного элемента, в зависимости от длительности цикла управления, при различных вариантах насыщенности магистрали. То есть рассматривалось три варианта отношения интенсивности потоков к пропускной способности. Нормальный режим (насыщение 33%), повышенный (насыщение 36-37%), свободный режим (насыщение 25-30%).

В качестве примера можно рассмотреть эксперимент с нерегулируемыми пересечениями. Было проведено по 9 экспериментов с различными длительностями цикла управления от 40 до 120 секунд, с интервалом 10 секунд. При различных показателях интенсивности, сравнивая значения целевой функции рассчитанной при оптимальных управляющих воздействиях из модели прототипа, и из новой модели были получены следующие зависимости см. рисунок 4.

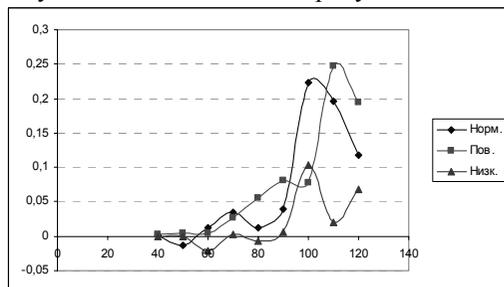


Рис. 4. Результаты эксперимента.

С помощью модельного эксперимента №3 было выявлено, что учет новых элементов транспортной сети, таких как, сужение проезжей части, просачивающиеся потоки на регулируемом перекрестке, нерегулируемые пересечения, дают до 25% выигрыша в среднем 10%-11% при поиске оптимальных параметров управления с точки зрения транспортной задержки. В сравнении с такой же процедурой

Модель можно представить в виде совокупности связанных функциональных элементов следующих типов: стоп-линии регулируемого многофазного перекрестка (рис. 4 блок №1), разделение потоков (рис. 4 блок №2), слиянием потоков (рис. 4 блок №3), перегон (расстоянием между 2-мя стоп линиями на смежных перекрестках) (рис. 4 блок №4), «просачивающийся» поток, конкурирующим с другим направлением на данном перекрестке в одной и той же фазе движения, расширение или сужение проезжей части (рис. 4 блок №5).

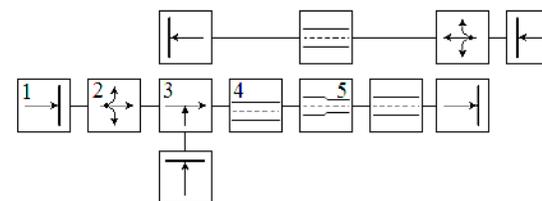


Рис.4. Функциональная схема сети перекрестков

Каждый функциональный элемент может иметь один или несколько входов и один или несколько выходов, для каждого элемента согласно принципам его работы происходит преобразование функции $q(t)$. На первом этапе моделирования $q(t) = const$ и равной средней интенсивности указанной как свойство соответствующей дуги.

Также на каждом элементе производится расчет времени суммарной задержки ТС. Суммарная задержка на элементе состоит из двух слагаемых: z – время задержки при запрещающем сигнале светофора и z_o – время остановки, когда запрета движению нет, но автомобиль не может ехать по иным причинам (очередь впереди не разгрузилась, помеха от основного потока для конфликтующих потоков и др.)

Интегральным показателем качества управления движением является суммарная взвешенная задержка, ТС во всей сети. Она высчитывается для всех элементов по следующей формуле.

$$Z = \sum_{i=1}^n (z_i v_i + z_{oi} v_{oi}),$$

где $i = (1, n)$, n - число функциональных элементов сети. v_i – вес задержки на i -ом направлении движения, v_{oi} – вес остановки на i -ом функциональном элементе сети.

Для расчета преобразования функции интенсивности и задержки ТС на таких элементах УДС как сужение проезжей части

дороги, лево-поворотные просачивающиеся потоки на регулируемом перекрестке, конфликтующие потоки на нерегулируемых пересечениях были предложены следующие формулы.

При сужении проезжей части характерно резкое изменение пропускной способности, обозначив максимальную пропускную способность исходящего потока из сужения – C' , а длину очереди – $l(t)$, формула преобразования может быть записана следующим образом

$$q^*(t) = \begin{cases} C' & \text{если } l(t) > 0 \\ q(t) & \end{cases}$$

, где

$$l(t) = l(t - \Delta t) + q(t) - C'$$

При сужении величина задержки ТС будет равна нулю, $z = 0$, так как отсутствует запрещающая фаза движения. Однако время остановки z_o на данном элементе может быть отличным от нуля, по причине того, что пропускная способность дороги в результате сужения может быть меньше интенсивности транспортного потока $C' < q(t)$.

Расчет времени остановки проводится по следующей формуле:

$$z_o = \sum_{t=a}^b q(t) \left(\frac{1}{C'} \sum_{\tau=a}^t q(\tau) \right)$$

, где a – момент времени, при котором интенсивность входящего потока начинает превышать значение максимума для исходящего потока, $q(a) > C'$; b – момент окончания разгрузки очереди $l(b) = 0$; C' – максимальная пропускная способность исходящего потока.

В случае с конфликтующими потоками (лево-поворотным на регулируемом перекрестке и второстепенном потоке на нерегулируемом пересечении неравнозначных дорог) используется формула динамической пропускной способности, которая зависит от двух величин, интенсивность потока $q_1(t)$ и пропускная способность $C_1 = const$ прямого (главного) направления движения:

$$\tilde{N}'(t) = C \left(\left(\frac{q_1(t)}{C_1} - 1 \right) \right)^{K_p}, \quad (1)$$

нерегулируемое пересечение, сужение дороги, просачивающийся лево-поворотный поток на регулируемом перекрестке не производится.

Новая модель - программное обеспечение, реализующее детерминированную модель движения транспортного потока, описанную в главе 2.

Процедура оптимизации – функция поиска оптимальных параметров управления, с точки зрения суммарной транспортной задержки во всей сети.

Пример транспортной сети содержащий несколько вновь введенных элементов строится в модели прототипе и в новой модели. Причем в модели прототипе новые элементы заменяются, если это возможно на существующие в ней элементы или не вводятся вовсе.

В модели-прототипе запускается процедура оптимизации, и рассчитываются оптимальные управляющие воздействия, а именно вектор начальных временных смещений 1-ой фазы движения каждого перекрестка.

В новой модели запускается процедура оптимизации, и также рассчитываются оптимальные управляющие воздействия и значение целевой функции – суммарной транспортной задержки в сети.

В новой модели запускается процедура расчета суммарной транспортной задержки в сети при оптимальных управляющих воздействиях, рассчитанных в модели прототипе.

Таким образом, можно рассчитать относительную эффективность внедрения в модель нового элемента транспортной сети, сравнивая показатели целевой функции при поиске оптимума с учетом новых элементов и значения целевой функции рассчитанной при оптимальных параметрах управления с точки зрения модели прототипа.

Метод оптимизации и его параметры абсолютно идентичны в обои случаях, различие состоит только в учете транспортной задержки на вновь введенных элементах дорожной сети и их влияние на функцию интенсивности ТП.

Всего было поставлено 5 различных экспериментов с 5-ю моделями транспортных сетей:

1. магистраль из пяти регулируемых перекрестков с односторонним движением, между каждым перекрестком в поток вливался дополнительный поток, на нерегулируемых пересечениях;
2. магистраль из пяти регулируемых перекрестков с односторонним движением, на двух из пяти перегонов которой произошло сужение магистрали, то есть пропускная способность уменьшилась на 50%;

одно лево-поворотное направлений будет просачиваться через одно, двух и трех полосный встречный поток транспортных средств.

Далее на каждом перекрестке необходимо замерить интенсивность транспортного потока в двух точках. Точка №1 – стоп линия прямого потока. Точка №2 выход из левого поворота – количество автомобилей, которым удалось просочиться через прямой.

Для каждого варианта экспериментальных данных подбирался коэффициент нелинейности, при котором они были наиболее близки к формуле (1).

На рисунке 3 изображены экспериментальные данные, полученные путем измерения интенсивностей на перекрестке ул. Яковлева – ул. Герцена Q2 и Q1 (черные точки) и кривые, построенные при различных коэффициентах K_p по формуле (1).

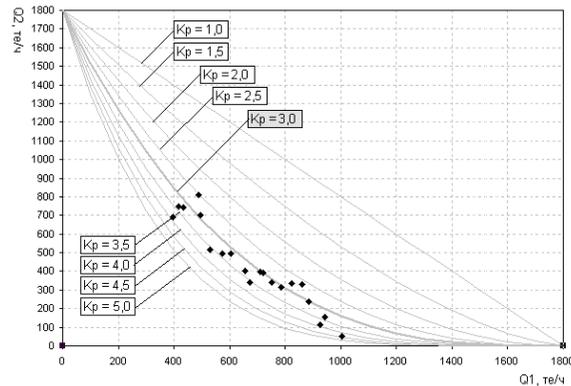


Рис. 3. Зависимости потока насыщения лево-поворотного направления от интенсивности прямого направления.

Для изучения эффекта от введения новых элементов в модель был проведен ряд экспериментов с различными видами дорожных сетей. В каждой дорожной сети был представлен один или несколько экземпляров вновь введенных элементов дорожной сети. Так же рассматривался случай, когда все вновь введенные элементы присутствовали одновременно.

Для лучшего понимания сути эксперимента необходимо ввести следующие понятия.

Модель прототип – программное обеспечение, реализующее детерминированную модель движения транспортного потока, в которой моделирование таких элементов транспортной сети, как

где $K_p > 1$ – коэффициент, зависящий от количества полос прямого направления.

Исследование адекватности формулы (1) и подбор коэффициента K_p описаны в главе 3.

Функция преобразования интенсивности ТП для лево-поворотного просачивающегося потока на регулируемом перекрестке может быть представлена следующим образом:

$$q^*(t) = \begin{cases} 0 & 0 < t \leq r \\ C'(t) & r < t \leq T, q(t) > C'(t) \\ q(t) & r < t \leq T, q(t) \leq C'(t) \end{cases}, \quad (2)$$

где r – момент окончания запрещающего сигнала светофора для данного направления, T – длительность цикла светофорного регулирования, (r, T) – время горения разрешающего сигнала светофора.

Для нерегулируемых пересечений, по причине отсутствия ограничений накладываемых запрещающим сигналом светофора, формула (2) принимает следующий вид:

$$q^*(t) = \begin{cases} C'(t) & q(t) > C'(t) \\ q(t) & q(t) \leq C'(t) \end{cases}$$

Процесс разгрузки лево-поворотного потока отличается от процесса на обычной стоп линии. Времена задержки и остановки также рассчитывается по специально введенным формулам.

Время задержки для лево-поворотных потоков рассчитывается по следующей формуле:

$$z = \sum_{t=0}^r q(t) \left((r-t) + d + \sum_{\tau=0}^t \frac{1}{C'(a_1 + \tau)} q(\tau) \right),$$

где

$$d = \frac{1}{C_1} \sum_{x=0}^{a_1} q_1(x)$$

Время задержки z считается для всех автомобилей, пришедших на запрещающий сигнал светофора. По этой причине сумма берется в границах от 0 до r – время запрещающего сигнала. Первый множитель под знаком суммы это число автомобилей пришедших в

момент времени t к стоп-линии, второй сомножитель (в скобках) это время, которое будут вынуждены ждать эти $q(t)$ автомобилей до момента выхода со стоп линии.

Первое слагаемое $(r - t)$ это время от момента прихода ТС к стоп линии до конца запрещающей фазы.

Так как лево-поворотный и прямой поток двигаются в одной фазе, разгрузка лево-поворотного потока невозможна в момент разгрузки прямого потока, поэтому автомобили из очереди должны подождать еще и время разгрузки очереди на прямом потоке - d , где a_1 – момент окончания разгрузки очереди на прямом потоке, C_1 – пропускная способность прямого потока, $q_1(x)$ – интенсивность прямого потока. Суммируя значения интенсивности потока на всем протяжении до момента окончания разгрузки очереди, получается число автомобилей остановленных на прямом направлении. Считая, что очередь разгружается с интенсивностью потока насыщения, указанное выражение будет временем на разгрузку прямого направления.

Третье слагаемое - это время на разгрузку всех ТС пришедших к стоп линии до текущего момента. C' - это функция динамической пропускной способности (1).

Формула расчета времени остановки на второстепенном просачивающемся направлении нерегулируемого перекрестка выглядит проще из-за отсутствия запрещающей фазы движения:

$$z_o = \sum_{t=a}^b q(t) \left(\sum_{\tau=a}^t \frac{1}{C'(\tau)} q(\tau) \right),$$

где a – момент времени, при котором интенсивность входящего потока начинает превышать значение максимума возможного просачивания, $q(a) > C'(a)$; b – момент окончания разгрузки очереди на второстепенном направлении движения $l(b) = 0$; C' – функция динамической пропускной способности (1).

В заключении второй главы приводится пример построения системы уравнений описывающих простую сеть транспортных потоков, с помощью приведенных выше формул преобразования функции интенсивности транспортного потока и аналогичных для других элементов транспортной сети города. Число уравнений в данной системе будет равно числу возможных маршрутов в сети от каждого входного до каждого выходного потока, в качестве неизвестных будут функции $q_i(t)$. Система уравнений строится таким

образом, что полагая часть неизвестных функций потоков постоянными значениями, можно найти все функции преобразования интенсивности потока на оставшихся элементах транспортной сети.

В третьей главе описывается методика проведения и результаты трех экспериментов для проверки адекватности модели, отбора численного значения коэффициента для формулы (1) и проверки эффективности введения новых элементов модели с точки зрения суммарной транспортной задержки, по сравнению с моделью прототипом.

Натурно модельный эксперимент базируется на массивах данных, относящихся к г. Красноярску. В качестве исходных данных об объекте управления для расчета управляющих воздействий используется информация по ул. Мира города Красноярска (перекрестки со светофорной сигнализацией и управляются из центра): схемы движения на перекрестках; длительности цикла; интенсивность движения; расстояние между перекрестками; средние скорости движения и другие параметры.

Результату моделирования были проверены в ходе серии проездов автомобиля по заданному маршруту с целью измерения среднего времени проезда. Результаты измерений и расчетов, сделанных с помощью модели, приведены в таблице 1.

Время проезда по магистрали Таблица 1

Напр. движения	L, м	Время проезда, с.			Модель
		Номер проезда			
		1	2	3	
Прямо	2500,0	360	372	350	345
Обратно	2500,0	320	329	329	321

Сравнение результатов свидетельствует о достаточно близком совпадении модельных и натуральных экспериментов, тем самым подтверждается достоверность предложенной модели.

Для следующего эксперимента был проведен ряд измерений интенсивности ТП на перекрестках имеющих просачивающиеся потоки. Просачивающийся поток был 3-х различных вариантов, то есть конфликтовал с одним, двух и трех полосным потоком. Подбирались коэффициенты нелинейности K_p для формулы (1) для каждого варианта. Для проведения данного эксперимента необходимо было найти три перекрестка в УДС города, где в какой-либо фазе движения