

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”

Факультет компьютерных наук

Кафедра *программирования и информационных технологий*

*Адаптивное светофорное регулирование на перекрестке с помощью
программы моделирования транспортных потоков*

ВКР Магистерская диссертация

09.04.02 Информационные системы и технологии

Информатика как вторая компетенция

Допущено к защите в ГЭК

Зав. кафедрой _____ *Н.А. Тюкачев, к.ф.-м.н., доцент* _____.2016

Обучающийся _____ *В.А. Нечипоренко, 2 курс, д/о*

Руководитель _____ *Н.А. Тюкачев, к.ф.-м.н., доцент*

Воронеж 2016

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Факультет компьютерных наук

Кафедра программирования и информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ

заведующий кафедрой

_____ Н.А. Тюкачев

подпись, расшифровка подписи

__._.2016

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПОЛНЕНИЕ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
ОБУЧАЮЩЕЙСЯ Нечипоренко Виталии Андреевны

1. Тема работы «Адаптивное светофорное регулирование на перекрестке с помощью программы моделирования транспортных потоков», утверждена решением ученого совета факультета компьютерных наук от __.__.2016
2. Направление подготовки 09.04.02 Информационные системы и технологии
3. Срок сдачи студентом законченной работы __.__. 2016
4. Календарный план:

№	Структура ВКР	Сроки выполнения	Примечание
	Введение	04.09.15-09.09.15	
1	Постановка задачи	10.09.15-15.09.15	
2.1	Анализ цели и объектов моделирования	16.09.15-31.10.15	
2.2	Классификация моделей по уровню детализации	01.11.15-14.11.15	
2.3	Микроскопические модели	15.11.15-23.11.15	
2.4	Статистические распределения в теории транспортных потоков	24.11.15-30.11.15	
2.5	Подходы к управлению транспортными потоками на регулируемых перекрестках	01.12.15-07.12.15	
2.6	Адаптивное светофорное регулирование	08.12.15-15.12.15	
2.7	Анализ существующих инструментов оптимизации светофорного регулирования	16.12.15-15.01.16	
2.8	Алгоритм нахождения оптимального цикла светофора	16.01.15-14.02.16	
3	Описание разработанного программного обеспечения	15.02.16-01.03.16	
3.1	Структура программного обеспечения	02.03.16-14.03.16	
3.2	Функционал программного обеспечения	15.03.16-15.04.16	
3.3	Интерфейсная часть	16.04.16-29.04.16	
4	Экспериментальное исследование	01.05.16-24.05.16	
	Заключение	25.05.16-26.05.16	
	Список использованных источников	27.05.16-28.05.16	
	Приложения	29.05.16-30.05.16	

Обучающаяся

подпись

расшифровка подписи

Руководитель

подпись

расшифровка подписи

Реферат

Текстовый документ 71 с., 20 рисунков, 15 формул, 35 источников, 4 приложения.

АДАПТИВНОЕ СВЕТОФОРНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ, ДОРОЖНЫЙ ЗАТОР, ИЗОЛИРОВАННЫЙ ПЕРЕКРЕСТОК, ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, МИКРОМОДЕЛИРОВАНИЕ, СВЕТОФОР, ПРОГРАММА МОДЕЛИРОВАНИЯ, ТРАНСПОРТНЫЙ ПОТОК, УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ.

Объектами исследования являются транспортный поток перед перекрестком и адаптивное светофорное регулирование.

Цель настоящей ВКР – разработка и исследование имитационной модели автотранспортных потоков для создания методики оптимизации светофорного регулирования на перекрестке, а также оценка эффективности полученной методики на заданной модели перекрестка.

В ходе работы представлены методы проектирования и оценки эффективности режимов регулирования на пересечениях. Особое внимание уделено параметрам транспортного потока, которые необходимы при проектировании режимов регулирования. Рассмотрены методики оценки эффективности регулируемых пересечений, а также программные продукты, применяемые при проектировании режимов регулирования.

Методы и средства проведения работы. При решении поставленных задач использовались методы математического и компьютерного моделирования, теория графов, теория транспортных потоков, вычислительного эксперимента, математической статистики.

Основные разделы – постановка задачи, анализ задачи, обзор существующих решений, теоретическая часть, используемый математический аппарат, реализация, апробация, тестирование, заключение.

Содержание

Введение.....	5
1 Постановка задачи.....	8
2 Анализ задачи.....	10
2.1 Анализ цели и объектов моделирования.....	10
2.2 Классификация моделей по уровню детализации.....	14
2.3 Микроскопические модели.....	18
2.4 Статистические распределения в теории транспортных потоков	23
2.5 Подходы к управлению транспортными потоками на регулируемых перекрестках.....	25
2.6 Адаптивное светофорное регулирование.....	26
2.7 Анализ существующих инструментов оптимизации светофорного регулирования	29
2.8 Алгоритм нахождения оптимального цикла светофора	34
3 Описание разработанного программного обеспечения.....	35
3.1 Структура программного обеспечения	35
3.2 Функционал программного обеспечения	36
3.3 Интерфейсная часть	43
Заключение.....	44
Список использованных источников.....	45
Приложение А.....	50

Введение

В настоящее время проблема перегруженности автомобильных дорог для большинства крупных городов является одной из центральных, требующих первоочередное решение. Проблема минимизации автомобильных пробок и заторов в российских мегаполисах чрезвычайно актуальна. Острота транспортной проблемы требует системного подхода к ее решению.

Стремительный рост автопарка негативно сказывается на пропускной способности дорожной сети городов. Необходимо предпринимать меры, нацеленные на решение проблемы дорожных заторов. Мероприятия могут иметь как административный характер, так и заключаться в строительстве новых и расширении действующих дорожных развязок.

Можно улучшить ситуацию на узловых участках дорожной сети за счет оптимизации светофорного регулирования. Оптимизация процесса светофорного регулирования – это постоянный объект исследований, внимание к которому растет пропорционально мировому уровню автомобилизации. Это направление экономически выгодно, на его реализацию затрачивается немного времени.

Компьютерное моделирование дорожного движения позволяет быстро и дешево узнать, например, к какому результату приведет изменение режима работы светофора без необходимости проводить данный эксперимент на реальном светофоре.

Имитационное моделирование – это метод исследования, при котором изучаемая система заменяется моделью, с достаточной точностью описывающей реальную систему, и с ней проводятся эксперименты с целью получения информации об изучаемой системе.

К имитационному моделированию прибегают, когда:

- дорого или невозможно экспериментировать на реальном объекте;

- невозможно построить аналитическую модель (в системе есть причинные связи, случайные переменные);
- необходимо симитировать поведение системы во времени.

При изучении движения транспортных потоков очень перспективно мультиагентное моделирование, позволяющее создать имитационную модель, адекватную реальной дорожной ситуации при заданном наборе исходных параметров и найти оптимальный светофорный режим регулирования.

Традиционно модели дорожного движения классифицируются по уровню детализации на макроскопические, микроскопические и мезоскопические. Отнесение модели к одному из классов определяет возможные области ее применения.

В макроскопических моделях дорожное движение представляется в виде потока частиц. Такие модели оперируют агрегированными данными и позволяют исследовать характеристики дорожного потока на участках большой площади.

В микроскопических моделях транспортные потоки образуются в результате взаимодействия отдельно моделируемых участников дорожного движения. Эти модели обеспечивают детальную имитацию передвижений и поведения участников движения.

В мезоскопических моделях отдельные участники дорожного движения представляются на высоком уровне детализации, а их поведение и взаимодействия описываются на низком уровне. Основным применением таких моделей служат области, требующие микроскопического представления участников движения на территориях с большой площадью.

Внедрение технических средств адаптивного координированного управления транспортными потоками позволяет до 20 % увеличить скорость сообщения по сравнению с жестким светофорным регулированием.

В России ведутся научно-исследовательские работы, направленные на изучение транспортных потоков и на разработку программного обеспечения. Применяются новые подходы в области транспортных потоков, например, используется теория систем массового обслуживания для создания математической модели регулируемого перекрестка [1 Завалищин]. Новый интересный подход моделирования предложил В. В. Семенов: переполненный поток принимается как начальное состояние дороги, а задача моделирования – перейти от заторного состояния к свободному [2 Семенов В. В].

Транспортная лаборатория иркутского государственного государственного университета (ИрГТУ) является разработчиком программы оптимизации светофорного регулирования «Светофор» [3 Краткое руководство]. Специалистами Института Системного Анализа РАН была разработана программа TransNet – программа моделирования транспортных потоков в сети крупного города [4 Швецов]. Специалистами компании Solaris Development и AGA Group разработан программный комплекс «Артерия 3.0» [5 Artery], пакет имитационного моделирования Aimsun 6.0 [6 Aimsun], оптимизационный пакет регулирования дорожного движения Transyt-7FR [7].

В зарубежных странах достигнуты значительные успехи в разработке и применении современных программных комплексов, помогающих эффективно управлять транспортной сетью города. Примерами таких программных продуктов являются PTV VISSIM [8 VISSIM], PTV VISUM [9 VISUM].

Стоит отметить, что существуют программы, которые моделируют движение транспортных средств на отдельном участке улично-дорожной сети [10 Ахмадинуров статья][11 Алюшин][12 Ахмадеева].

1 Постановка задачи

Необходимо разработать имитационную модель, позволяющую моделировать транспортные потоки. Данная система должна отвечать следующим требованиям:

- моделирование транспортных потоков на регулируемом перекрестке;
- определение наилучшего режима работы светофора;
- сохранение результатов моделирования;
- вывод результатов статистического эксперимента;
- обработка результатов статистического эксперимента.

К разрабатываемой модели предъявляются следующие требования и ограничения:

- микроскопический имитационный подход к моделированию;
- безаварийное движение транспортных средств (далее ТС);
- при проезде перекрестка ТС могут изменить направление движения прямо, налево, направо. Если из текущей полосы совершение маневра невозможно, происходит попытка смены полосы движения;
- наличие светофоров без дополнительных секций на каждом направлении перекрестка;
- задание произвольного режима работы светофора;
- получение разнообразной информации о ТС (количество автомобилей, прибывающих на перекресток на различные фазы светофора, длина очереди перед светофорами);
- возможность конфигурации проезжей части (установка количества полос движения) и регулируемого пересечения;

- учет зависимости интенсивности дорожного движения от времени и пропускной способности;
- учет различных транспортных средств (габариты, предпочтительная скорость передвижения);
- графическое отображение результатов работы модели в режиме реального времени.
- возможность использования модели для интеллектуального управления дорожным движением (ДД) подразумевает наличие адаптивного режима работы светофора.

2 Анализ задачи

Для моделирования улично-дорожной сети необходимо воспользоваться методами имитационного моделирования, которое в отличие от аналитического моделирования позволяет описывать системы произвольной сложности. Имитационная модель реализует логику функционирования системы и взаимодействие элементов системы во времени, учитывая наиболее существенные причинно-следственные связи, присущие рассматриваемой системе. Для реализации имитационной модели необходимо первоначально [13]:

- определить объект и цели моделирования;
- составить концептуальную модель;
- определить общую математическую модель;
- разработать общий моделирующий алгоритм.

2.1 Анализ цели и объектов моделирования

Любая автоматизированная система управления, к которой в полной мере относится интеллектуальная транспортная система (далее ИТС), делает одну простую вещь: она собирает информацию об объекте управления, анализирует ее и оказывает на этот объект прямое или косвенное управляющее воздействие.

Объектом управления для ИТС являются транспортные потоки. Источником информации об объекте управления являются датчики и детекторы на дороге, смежные информационные системы и ввод данных оператором.

Для анализа информации об объекте управления необходимо заложить в систему некое представление об этом объекте, которое и называется моделью. Детальность и точность модели определяется исключительно задачами, стоящими перед ИТС.

Целью создания модели является оценка эффективности работы дорожной сети в зависимости от конфигурации сети и способа светофорного регулирования. Оценка эффективности производится на основе информации о передвижении транспортных средств в рамках модели.

Необходимо выделить основные составляющие модели и их параметры, а также определить основные характеристики транспортных средств, на основе которых будет проводиться анализ эффективности работы моделируемой дорожной сети.

Взаимодействие модели с внешней средой заключается в возможности извне динамически управлять режимом работы светофоров. Соответственно, необходимо описать способ такого управления светофорами.

В данной работе объектом моделирования является регулируемый перекресток (рисунок 1). Он является наиболее важным элементом улично-дорожной сети, поэтому сейчас в мире разработано большое множество компьютерных программ для анализа и моделирования как существующих, так проектируемых регулируемых пересечений. Несмотря на то, что среди этого множества программ существуют такие, которые предоставляют информацию о задержках на перекрестке, длинах очередей на подходах к перекрестку, потоке насыщения, и уровне обслуживания, нет ни одной программы, позволяющей предоставить сразу все эту информацию как для существующих, так и для проектируемых условий движения. Так, например, если два пересечения расположены слишком близко друг к другу, одна компьютерная программа может быть полезной для определения задержек на пересечении, но не является эффективным средством для определения других параметров транспортного потока таких, как длина очереди.

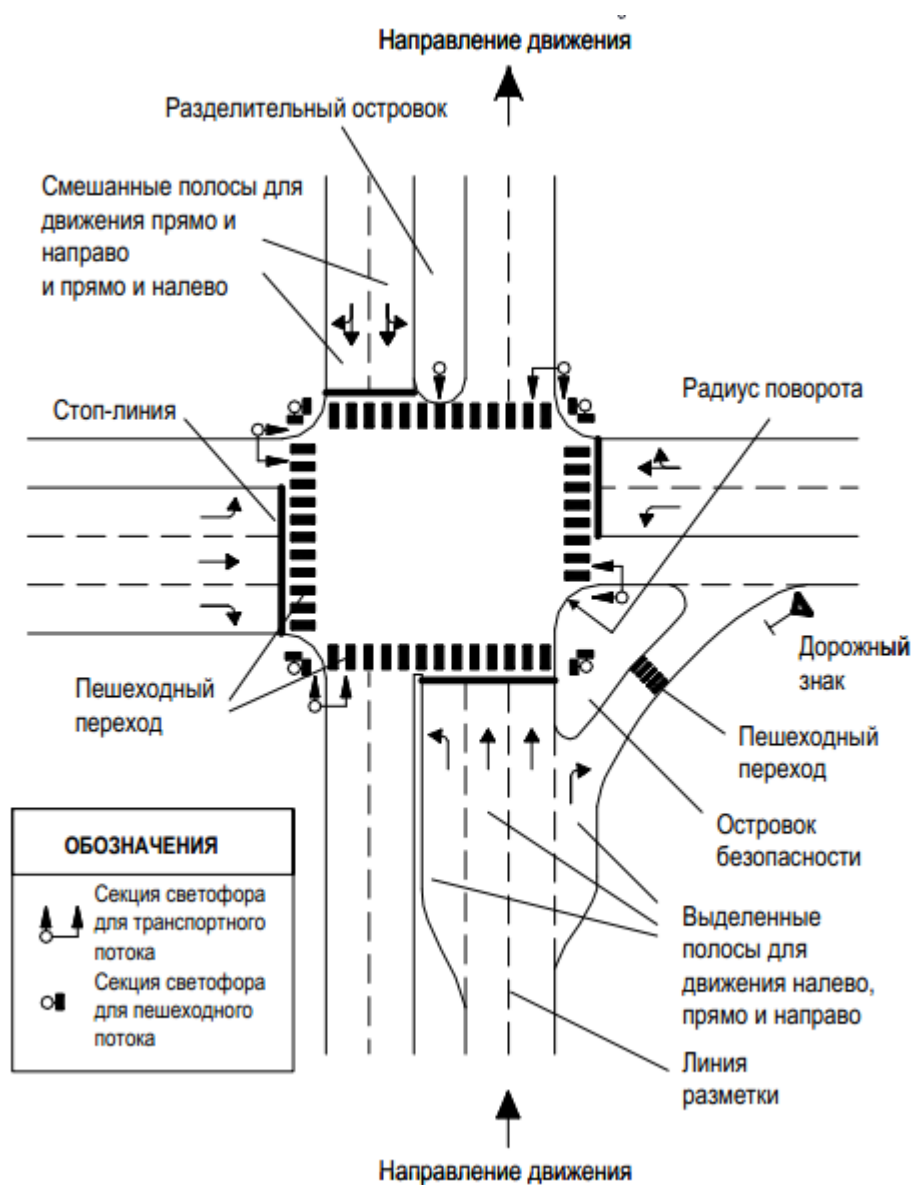


Рисунок 1 – Геометрические элементы регулируемого перекрестка и элементы управления транспортными и пешеходными потоками

Систему перекрестков со светофорами можно представить в виде графа, вершинами которого являются перекрестки, а ребрами – улицы. Например, как это изображено на рисунке 2.

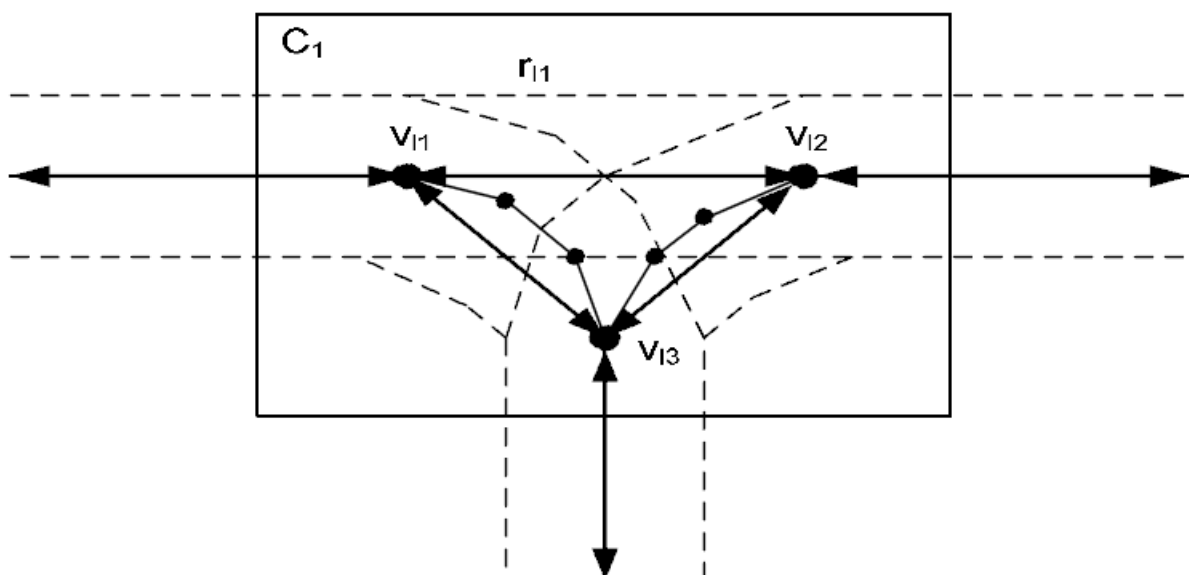


Рисунок 2 – Представление Т-образного перекрестка в виде двухслойного ориентированного графа

Граф состоит из двух слоев: топологического – для представления пространственных характеристик дорожной сети и логического – для представления семантических свойств.

Первый слой задается в виде ориентированного графа:

$$G_t = \langle V_t, R_t \rangle, \quad (1)$$

где V_t – множество топологических вершин, соответствующих пространственным точкам виртуального мира; R_t – множество топологических ребер, определяющих наличие проезжей части между топологическими узлами.

Второй слой задается в виде ориентированного графа:

$$G_l = \langle V_l, R_l \rangle, \quad (2)$$

где $V_l \subseteq V_t$ – множество логических вершин, базирующихся на топологических вершинах; R_l – множество логических ребер, определяющих наличие логического участка дороги между логическими узлами.

На основе последнего могут быть введены модели представления перекрестков:

$$C_i = \langle V_{li}, R_{li} \rangle, \quad (3)$$

где $V_{li} \subseteq V_l$ – множество логических вершин, образующих i -ый перекресток;
 $R_{li} \subseteq R_l$ – множество логических ребер, соединяющих узлы перекрестка.

2.2 Классификация моделей по уровню детализации

Созданные модели исторически разделились на три группы: макро–, мезо– и микромодели, различающиеся степенью детализации моделируемого объекта.

Макромодели строятся преимущественно на основе методов гидродинамики. При этом изучаются характеристики потока: плотность, средняя скорость, интенсивность без учета его составных частей (транспортных средств). Моделирование в данном случае устанавливает функциональные зависимости между отдельными показателями потока, например, скоростью и дистанцией между автомобилями в потоке. Динамические макроскопические модели, такие как модель Лайтхилла–Уитема–Ричардса LWR (Lighthill, Whitham и Richards), описывают процесс изменения транспортного потока во времени и пространстве с помощью дифференциальных уравнений. Уравнения описывают изменения определенного параметра, характеризующего транспортный поток, например, плотность потока автомобилей, среднюю скорость движения автомобилей, пропускную способность дорожного участка. Решение уравнений может быть получено аналитически или с помощью моделирования.

Как правило, макроскопические модели имеют невысокие требования к компьютеру. Среди программных продуктов, реализующих макроскопический подход, можно отметить следующие: PTV VISSUM (интерфейс программы приведен на рисунке 3), SimTraffic, PARAMICS. Главным преимуществом макромоделей по настоящее время остается скорость расчета показателей управления. Главным недостатком данных

моделей является слабая точность в предзаторных и заторных условиях движения.

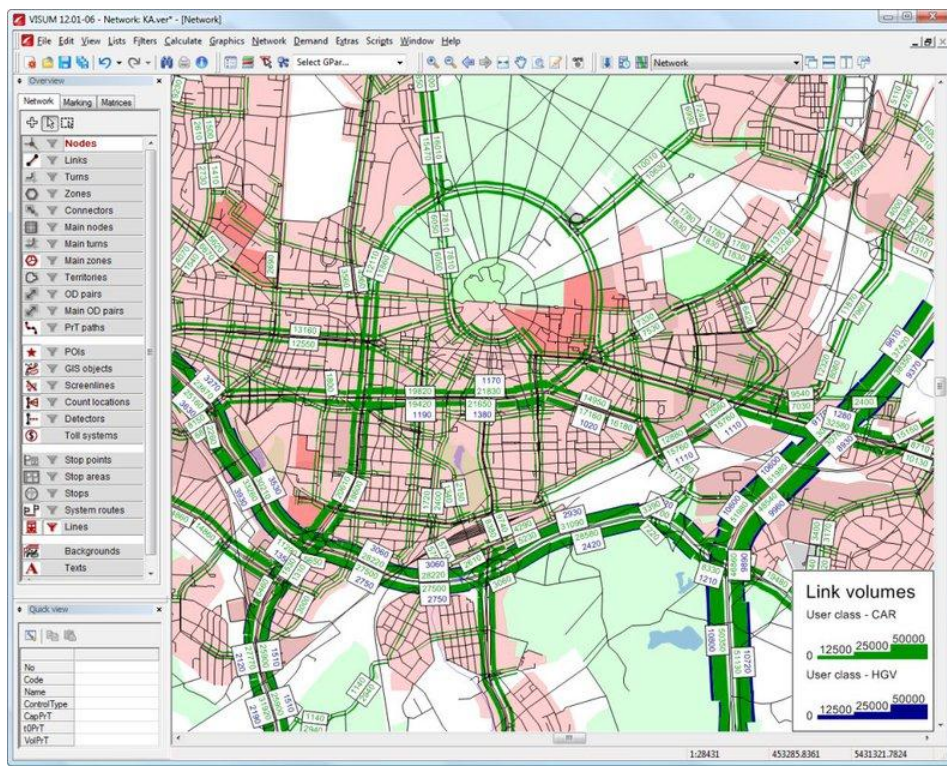


Рисунок 3 – Интерфейс программы для макро моделирования PTV VISSUM

В противовес макро моделям были разработаны микро модели. Микро моделирование в деталях описывает поведение автомобилей, создающих транспортный поток. Микро модели оперируют конкретными объектами из реального мира такими, как регулируемый перекресток, транспортная развязка, сеть улиц, автомобиль. Характер поведения автомобиля описывается с помощью правил, которые определяют, когда автомобиль ускоряется, замедляет скорость перестраивается в другой ряд, а также когда и как автомобиль выбирает и меняет свой маршрут следования.

Если провести обобщение микроскопических моделей, то основными исходными данными для их функционирования являются количество полос для движения, ширина полос для движения, структура транспортного потока, интенсивность транспортных потоков, допустимая скорость движения,

приоритетные направления движения, параметры светофорного регулирования. В данном случае детально имитируется движением транспортных средств с целью установления показателей эффективности функционирования локального участка улично-дорожной сети. В результате работы микроскопических моделей, как правило, получают следующие выходные данные: длина очереди, задержки транспортных средств, уровень обслуживания, средняя скорость, максимальная или минимальная скорость, время движения, анимационное изображение локального участка сети.

Главным достоинством данных моделей является существенно большая точность и гибкость, позволяющая производить моделирование транспортных потоков с наиболее сложными топологиями транспортной сети. Главным недостатком является высокая вычислительная сложность, не позволяющая использовать данный класс моделей при адаптивном управлении в реальном времени.

Известными микроскопическими моделями являются: модель движения за лидером, модель клеточных автоматов Нагеля [25 Rickert] и модель «умного водителя» Мартина Трайбера, Ансгара Хенека и Дирка Хельбинга [27 Treiber].

К программным пакетам, позволяющим строить микроскопические симуляционные модели, относят: MITSIM (Microscopic Traffic Simulator), PTV VISSIM, AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks). Интерфейс пользователя последнего программного продукта приведен на рисунке 4.

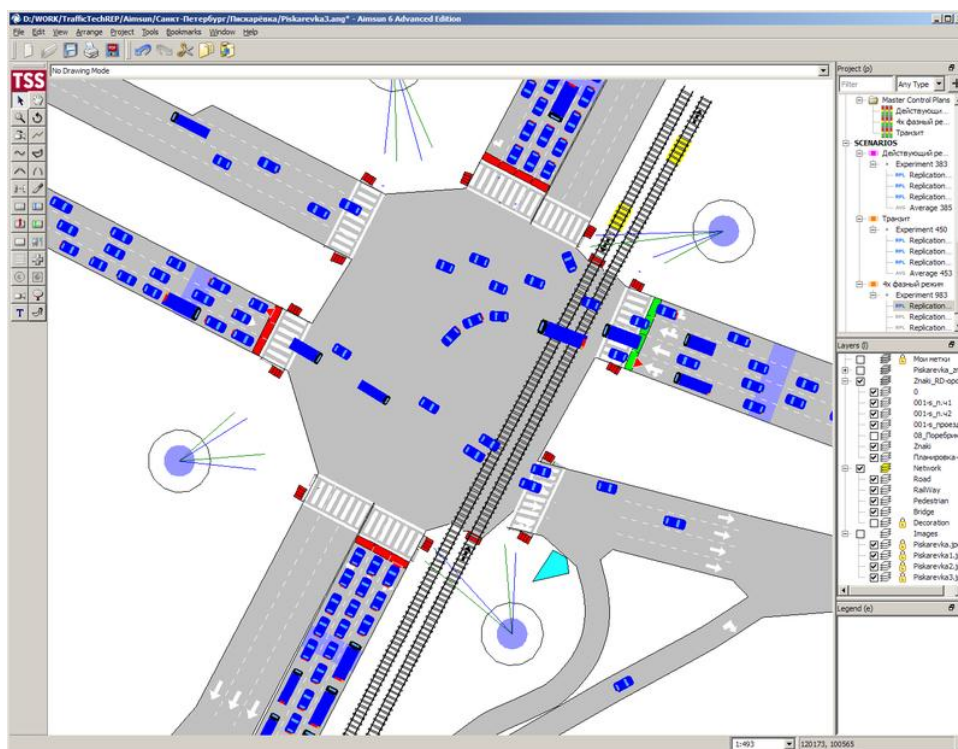


Рисунок 4 – Интерфейс программы для микромоделирования AIMSUN

Наиболее перспективным компромиссом являются мезомодели динамики [28 Osorio], так как они описывают автомобили на высоком уровне детализации (элемент микромоделирования), а их поведение и взаимодействие – на низком уровне (элемент макромоделирования). В этом случае также как и при макроскопическом моделировании, могут быть получены характеристики транспортного потока (скорость, плотность, задержки на перекрестке). Данные модели строятся на основе теории массового обслуживания с использованием данных, полученных при исследовании микромоделей. Транспортный поток рассматривается как набор нескольких групп сущностей, действия которых и взаимодействие между которыми рассматривается с высокой степенью подробности. Например, смена полосы автомобилем может быть представлена как мгновенное событие, совершение которого зависит от плотности потока на соседних полосах разницы в скоростях. Мезоскопическое моделирование применяется там, где желательно использовать микроскопические модели, но

невозможно из-за большого размера транспортной сети или ограниченности ресурсов, которые требуется затратить на создание и отладку сети.

Инструментами, реализующими мезоскопическое имитационное моделирование, являются: CONTRAM (Continuous Traffic Assignment Model), DYNAMIT-P, DYNASMART, FASTLANE, DTASQ, MesoTS [29 Бекмагамбетов].

2.3 Микроскопические модели

Как правило, характер поведения автомобиля описывается с помощью правил, которые определяют, когда автомобиль ускоряется, замедляет скорость, перестраивается в другой ряд, а также когда и как автомобиль выбирает и меняет свой маршрут следования.

Исходя из того, что создаваемая модель будет использоваться в первую очередь для оптимизации работы светофоров, является целесообразным использование в ней микроскопического подхода, в рамках которого можно выделить несколько основных направлений.

Модели, которые управляют поведением автомобилей, подразделяются на модель следования за лидером (car-following model), модель смены ряда (lane-change model) и модель выбора маршрута (route-choice model). Модель следования за лидером описывает характер ускорения и торможения транспортного средства при взаимодействии его с другими участниками дорожного движения. Модель смены ряда учитывает условия принятия решения для перестроения автомобиля в другой ряд. Одна из моделей смены ряда называется MOBIL (Minimizing Overall Braking decelerations Induced by Lane changes). Модель выбора маршрута описывает механизм определения оптимального маршрута исходя из места пребывания и места назначения, а также правила реагирования на изменяющуюся ситуацию на дороге во время следования пути. Программа микромоделирования AIMSUN имитирует поведение каждого автомобиля в потоке по всем вышеперечисленным

моделям поведения.

Модель оптимальной скорости была предложена М. Бандо и характеризуется следующими особенностями: автомобиль будет придерживаться максимальной скорости с достаточным расстоянием до следующего автомобиля, а также двигаться с оптимальной скоростью, опираясь на расстояние до следующего автомобиля. Движение автомобиля задается через уравнение ускорения (4):

$$\dot{v} = \frac{dx}{dt^2} = \alpha [V_{optimal}(\Delta x) - v], \quad (4)$$

где α – скорость реакции водителя (обычно α равно 1); Δx – дистанция до впереди едущего автомобиля, $\Delta x = x_{i+1} - x_i$, v – текущая скорость автомобиля.

Функция $V_{optimal}$ обозначает оптимальную скорость:

$$\Delta x = th(\Delta x - 2) + th(2), \quad (5)$$

где th – гиперболический тангенс.

Существуют улучшения модели Бандо, например, модель с разделенными ускорением и торможением.

Модель Видеманна предполагает, что автомобиль может находиться в одном из четырёх состояний: свободное движение (водитель стремится набрать желаемую скорость и в дальнейшем не изменять её, влияния едущих впереди автомобилей нет. В реальности скорость не является строго постоянной, а колеблется около заданной). В случае возникновения впереди едущего автомобиля водитель сбрасывает скорость своего автомобиля и соблюдает безопасную дистанцию, тем самым осуществляет приближение. Далее водитель следует за едущим впереди автомобилем без ускорения или торможения (скорости транспортных средств приблизительно одинаковые), поддерживая безопасную дистанцию. Торможение применяется только, если расстояние между автомобилями становится меньше безопасной дистанции.

Модель умного водителя (The Intelligent Driver Model или сокращенно IDM) относится к классу моделей следования за лидером и описывается через обыкновенное дифференциальное, где расстояние и время являются непрерывными переменными. Кроме фактической скорости автомобиля $v(t)$ и дистанции до ведущего автомобиля $s(t)$ в модели также учитывается разность скоростей $\Delta v(t)$, которая играет стабилизирующую роль и является неотъемлемой частью реального потока автомобилей, особенно когда поток становится плотным и возникает вероятность столкновения [27 Treiber].

Параметры модели «умный водитель» приведены на рисунке 5 (автомобиль $\alpha - 1$ является лидером для автомобиля α).

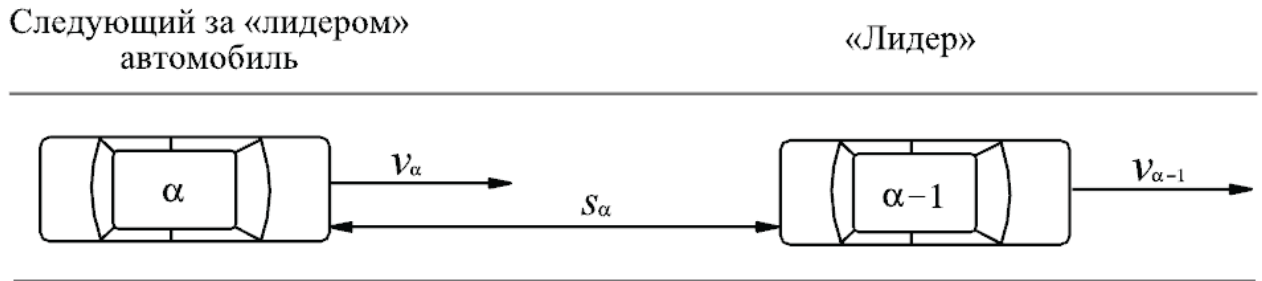


Рисунок 5 – Параметры модели «умный водитель»

В этой модели ускорение задается формулой (6):

$$\dot{v} = \frac{dv_a}{dt} = f(s_a, v_a, \Delta v_a) = a \left[1 - \left(\frac{v_a}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s'(v_a, \Delta v_a)}{s_a} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где a – максимальное ускорение; v_a – текущая скорость; v_0 – желаемая скорость (скорость, с которой автомобиль перемещался бы в свободном потоке); s_a – фактическая дистанция между автомобилями в данный момент времени; s' – эффективная минимальная дистанция; δ – экспонента ускорения.

Уравнение ускорения автомобиля задается в виде (7):

$$\dot{v}_{speed}(v) = a \left[1 - \left(\frac{v_a}{v_0} \right)^\delta \right]. \quad (7)$$

Функция ускорения позволяет плавно увеличивать скорость автомобиля v_a от нуля до желаемого значения v_0 . Значение экспоненты ускорения δ определяет, как уменьшается ускорение автомобиля по мере достижения желаемой скорости передвижения. При $\delta \rightarrow 0$ транспортное средство будет набирать желаемую скорость с постоянным ускорением. При $\delta = 1$ изменение ускорения будет происходить экспоненциально.

Функция торможения необходима для того, чтобы предотвратить столкновение транспортных средств.

Уравнение торможения автомобиля задается в виде (8):

$$\dot{v}_{break}(s_\alpha, v_\alpha) = \begin{cases} -a \left(\frac{s_0 + v_\alpha T'}{s_\alpha} \right)^2, & s_\alpha \in [1, 10]; \\ 0, & s_\alpha > 10, \end{cases} \quad (8)$$

где s_α – дистанция до впереди едущего автомобиля (измеряется в метрах), s_0 – минимальное расстояние между автомобилями, которое сохраняется даже в пробке, T' – желаемый временной интервал – время движения автомобиля со скоростью v_α до столкновения с впереди едущим автомобилем, v_α – текущая скорость.

Таким образом, автомобиль плавно набирает скорость от 0 до желаемой v_0 с вычисляемым ускорением \dot{v}_{speed} , которое зависит от скорости v_α в данный момент времени и от заданного максимального значения ускорения a . Снижение скорости в случае возникновения препятствия перед автомобилем осуществляется с помощью функции \dot{v}_{break} , которая зависит от расстояния до препятствия s_α , скорости автомобиля v_α , от параметров T и s_0 .

Исходя из (6) и (7) уравнение (5) можно переписать в упрощенном виде, состоящем из двух частей (9):

$$\dot{v} = \dot{v}_{speed}(v) + \dot{v}_{break}(s, v, \Delta v). \quad (9)$$

Стохастичность моделирования достигается за счет того, что

параметры, характеризующие индивидуальные особенности стиля вождения водителя, вычисляются отдельно для каждого автомобиля случайным образом в соответствии с равномерным распределением с разбросом, равным 20%. В качестве исходных значений временная задержка T принимает различные значения. Минимально допустимое значение параметра – 0.5 секунды. Рекомендованное значение для T – 2 секунды (1 секунда на реакцию водителя и 1 секунда на торможение), для s_0 – 1.5 метра, для a – 2 м/с²

Эффективным и информативным способом моделирования движения совокупности транспортных средств по магистрали являются клеточные автоматы. Модели, основанные на клеточных автоматах, являются дискретными: дорога разбивается на секции определенной длины, а время – на шаги. Каждая секция дороги может быть либо занята одним транспортным средством, либо быть пустой.

Концепция клеточных автоматов была введена Дж. Фон Нейманом в 50-е годы XX века. Применять клеточные автоматы для моделирования транспортных потоков предлагалось в работе [11 **Алюшин**]. Пример автомата представлен массивом ячеек длины N и ширины M (число полос) на рисунке 6. Длина ячейки l_i характеризует разрешающую способность автомата.

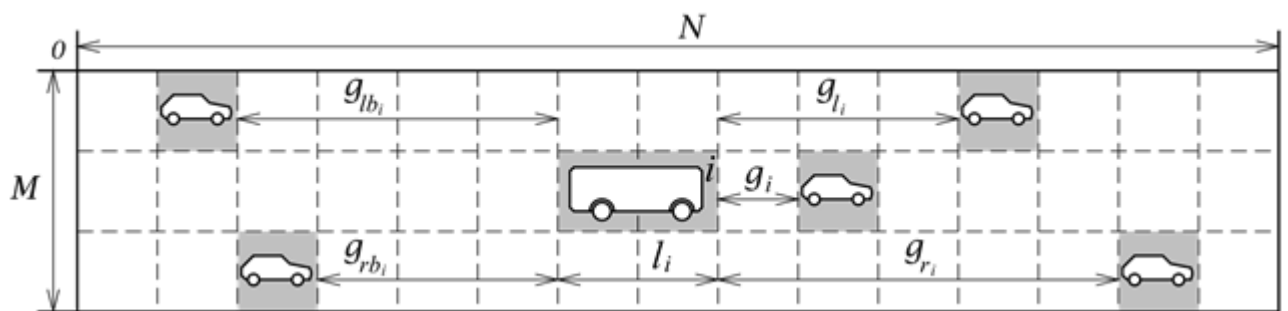


Рисунок 6 – Многополосный транспортный клеточный автомат 3x15

На массиве в произвольном порядке располагаются транспортные средства, позиция i -го автомобиля определяется переменными n_i (ячейка) и

m_i (полоса). Каждая машина принадлежит к определённому типу (легковой, грузовой, автобус). Число ячеек, необходимое для представления автомобиля, различается в зависимости от его типа. Максимальная скорость автомобиля также зависит от его типа. Текущий момент времени (итерация) обозначается переменной t .

Применение клеточных автоматов в моделировании дорожного движения является молодым и перспективным направлением, характеризуемым высокой вычислительной скоростью и эффективностью. Этот подход может быть классифицирован как имитационный и позволяет представлять динамику системы во времени. Кроме того, разделение машин по типам в этом случае является простой задачей, что отличает его от аналитических моделей.

2.4 Статистические распределения в теории транспортных потоков

Микро- и мезоскопические модели базируются на гипотезе о статистическом распределении прибытий транспортных средств к данному участку УДС. Распределения временных интервалов между транспортными средствами в различных транспортных потоках имеет важную роль в представлении нерегулируемого перекрестка. Чаще всего принимается за основу гипотеза о пуассоновском распределении прибытий транспортных средств к данной точке УДС, то есть предполагается, что интервалы между автомобилями распределены по экспоненциальному закону. Это распределение предсказывает большое количество продвижений с интервалом меньшим, чем одна секунда, что, как известно, нереалистично. Данное распределение широко применяется в силу своей простоты. Экспоненциальное распределение дает хорошую сходимость с экспериментальными данными только в случае малой интенсивности транспортных потоков.

Входной поток автомобилей задается с помощью так называемых генераторов (имитация мест, где появляются транспортные средства). У каждого генератора указываются следующие параметры:

- место создания автомобилей;
- интенсивность (количество автомобилей в минуту);
- направление движения и максимальная скорость автомобилей (км/ч).

После чего генератор с заданным интервалом времени создает автомобили в указанном месте.

В результате анализа существующих законов распределения был выбран способ генерации временных интервалов между созданием автомобилей по показательному распределению. Интенсивность входного потока λ характеризуется средним количеством автомобилей, приезжающих к перекрестку за определенный промежуток времени.

Функция показательного распределения имеет вид (10):

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

Рассмотрим случай $x \geq 0$ и обозначим $y = F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$. Из данной формулы найдем x (11):

$$x = -\frac{\ln(1-y)}{\lambda}, \quad (11)$$

где y – случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0, 1]$; x – случайная величина, имеющая показательное распределение с параметром λ . Значение параметра y генерируется с помощью датчика случайных чисел – функции Random, которая возвращает непрерывную случайную величину, равномерно распределенную на заданном отрезке. В нашем случае $y \in [0; 1]$.

2.5 Подходы к управлению транспортными потоками на регулируемых перекрестках

На сегодняшний день при управлении транспортными потоками применяется множество различных методов. Далее приведены таковые от наиболее старых до наиболее современных:

- Независимое жёсткое управление перекрёстком. Наиболее традиционный метод, не учитывающий состояние других перекрёстков. Используется метод Вебстера.
- Фиксированное координированное управление составляется для различных условий: день, ночь, утро, вечер, день недели, выходной или рабочий, время года и т.п. Метод имеет название TRANSYT и был разработан в Великобритании в 1960-х годах; в отечественной литературе метод называется методом зелёной волны [17 Кременец].
- Автоматизированное координированное управление светофорными объектами (СО) управляют дорожные контроллеры (ДК), которые сами выбирают предварительно рассчитанную программу координированного управления (ПКУ) по показаниям с детекторов транспорта (ДТ) [15 Агуреев][16 Кретов] [22Traffic control systems handbook]. Метод применяется в большинстве отечественных АСУДД [23 Петров].
- Параметрическое адаптивное управление (ПКУ формируется однократно, задавая таким образом структуру управления, далее по данным с ДТ производится регулирование параметров СО с учётом динамики движения транспортных потоков. Так работает большинство зарубежных АСУДД, например, SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimization Technique) [24 Adaptive Traffic Control

Systems]. Эта система позволяет изменять параметры цикла светофорного регулирования в определенных границах в зависимости от информации транспортных детекторов, измеряющих наличие и длину очередей на светофорах. SCOOT совмещает преимущества фиксированных планов координации для сети и адаптивного управления, когда интеллектуальный светофор сам управляет циклом и длительностями зеленых сигналов [32 **Михеева**].

- Структурное адаптивное управление. АСУДД полностью автоматически формирует структуру управления и параметры работы СО. Данный метод является наиболее затратным относительно производительности и применяется в наиболее современных зарубежных АСУДД [21 **Traffic control systems handbook**].

Выбор метода управления зависит от степени загруженности транспортной сети. В случае перегруженной транспортной системы эффективными являются только адаптивные методы управления. Таким образом, рассматривая задачу оптимизации управления ТП в мегаполисе актуально рассматривать структурное адаптивное управление.

2.6 Адаптивное светофорное регулирование

Одной из перспективных областей в сфере управления дорожным движением являются адаптивные системы. Адаптивные (интеллектуальные) системы управления дорожным движением – это системы, которые изменяют режим работы светофоров в соответствии с текущей ситуацией на дороге.

Для того, чтобы понимать с какими параметрами работают управляющие алгоритмы, необходимо знать пять базовых определений светофорного регулирования [14 **Кременец**].

Такт регулирования (Interval) – период действия определенной комбинации светофорных сигналов.

Фаза регулирования (Signal Phase) – совокупность основного и следующего за ним промежуточного такта.

Цикл регулирования (Signal Cycle) – периодически повторяющаяся совокупность всех фаз.

Наглядно понятия цикла, фазы и интервала, изображены на **рисунке 7**.

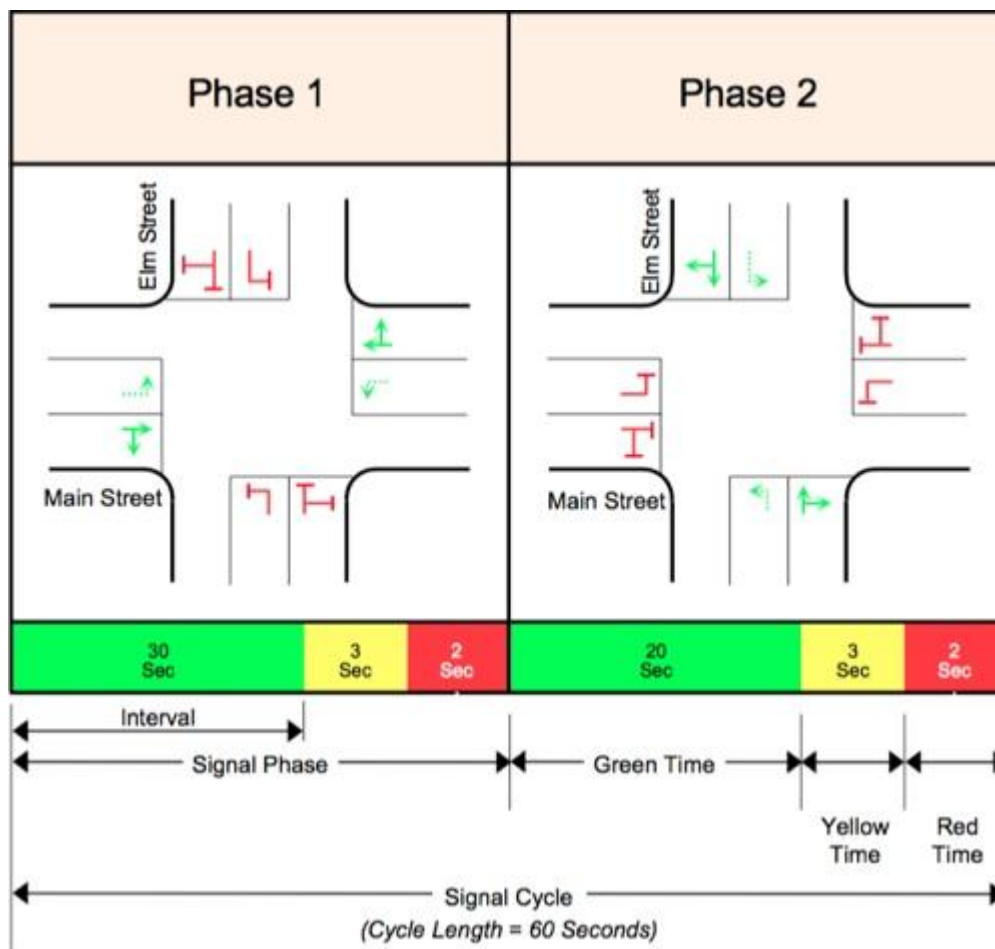


Рисунок 7 – Такты, фазы и циклы работы светофорного объекта

Секция регулирования (Split) – процент цикла регулирования, выделенный каждой из фаз регулирования [23 Traffic Control Systems Handbook]. Другими словами, изменяя процент времени на фазу, можно управлять длительностью зеленого сигнала на наиболее нагруженном

направлении. На отдельно стоящем перекрестке это дает уменьшение задержек.

Смещение (Offset) – разница (в секундах или процентах от цикла регулирования) между часами на конкретном перекрестке и мастер-часами (на сети перекрестков) [23 Traffic Control Systems Handbook].

Рисунок 8 наглядным образом иллюстрирует понятие смещения.

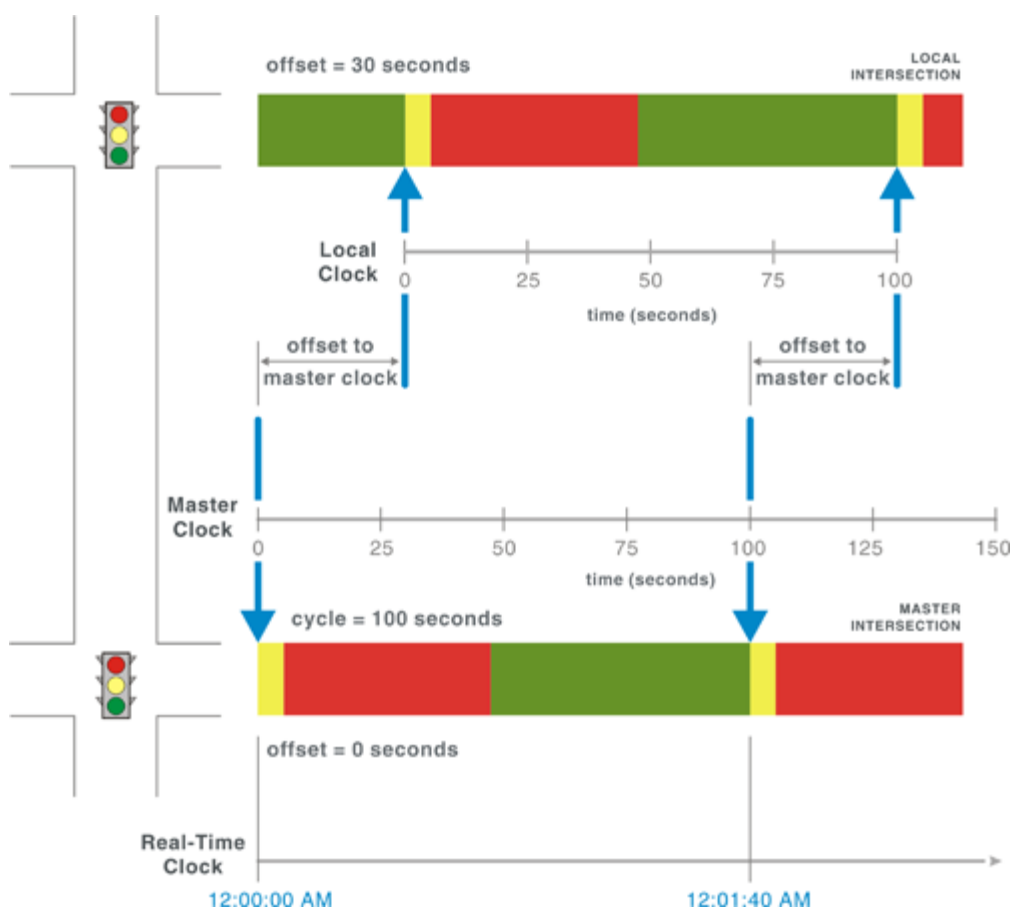


Рисунок 8 – Определение смещения регулирования светофорного объекта

Адаптивное управление как способ автоматизирования движения транспортных потоков на регулируемых перекрестках находит отражение во многих работах. Например, реализация подобного контроллера приведена в работе [15 Innoros].

Некоторые адаптивные алгоритмы [16 Кочерга][17 Агуреев][18 Кретов] находят применение при разработке пакетов имитационного моделирования и не лишены недостатков.

Наряду с такими подходами, как транспортно-зависимое управление с оптимизацией параметров регулирования в реальном времени, применяется также «мягкое» программирование светофорных объектов с использованием нечеткой логики (НЛ) [19 Заде]. Подобные решения нашли применение в работах [20 Кущенко][21 Андронов]. При использовании аппарата НЛ дискретные уровни интенсивностей движения представляют непрерывной величиной, что в случае дорожного регулирования позволяет гибко приспособить задачу к особенностям трафика конкретного перекрестка путём обучения экспертным способом или на основе обучающей выборки.

2.7 Анализ существующих инструментов оптимизации светофорного регулирования

Для формирования интегральных моделей, позволяющих производить расчёт показателей качества управления, а также оптимизацию параметров светофора, используются специализированные пакеты, такие как: PTC VISSIM, TRANSYT-7F, SUMO (Simulation of Urban Mobility), MITSIMLab (Microscopic Simulation Laboratory), PASSER V, Synchro. Детальный анализ возможностей представленных пакетов можно найти в отчёте проекта SMARTTEST [21 Smartest]. К сожалению, большинство пакетов труднодоступно для исследования ввиду закрытости исходного кода и платной лицензии. Далее подробно рассматриваются некоторые из них.

Современным инструментом для оценки эффективности внедрения интеллектуальных транспортных систем на дорогах является создание моделей функционирования объектов с использованием современного программного обеспечения, например технологий моделирования PTV.

Программный комплекс PTV VISSIM позволяет имитировать движение транспорта и пешеходов (имитационное моделирование), что позволяет ему быть необходимым инструментом при анализе проектных и организационных решений, если речь идёт о планировании движения.

Программа позволяет [8]:

- Оценить влияния типа пересечения дорог на пропускную способность (нерегулируемый перекрёсток, регулируемый перекрёсток, круговое движение).
- Осуществлять проектирование, тестирование и оценку влияния режима работы светофора на характер транспортного потока (рисунок 9).
- Анализировать управление дорожным движением на автострадах и городских улицах, контролировать направление движения, как на отдельных полосах, так и на всей проезжей части дороги.
- Анализировать влияние управления движением на ситуацию в транспортной сети (регулирование притока транспорта, изменение расстояния между вынужденными остановками транспорта, проверка подъездов, организация одностороннего движения и полос для движения общественного транспорта).
- Осуществлять детальную имитацию движения каждого участника движения.



Рисунок 9 – Модель движения транспортных средств в 3D

Реализованный в программе PTV Vision VISSIM алгоритм, работает по количеству проезжающих через перекресток автомобилей, где запрещающий сигнал включается, когда последний автомобиль на одной из дорог покидает перекресток. Однако этот алгоритм не учитывает, по каким направлениям прибывают и убывают автомобили, а также пропускную способность каждого из направлений [21 Андронов].

Оптимизационный пакет регулирования Transyt-7FR – единственное на сегодняшний день в мире программное средство, которое сочетает в себе возможность проведения оптимизационного расчета режимов работы светофора с современным представлением о макроскопическом моделировании транспортных потоков, учитывающим такие факторы, как прирост очереди, platoon dispersion, изменения параметров транспортных потоков при актуальном управлении [7].

Transyt-7FR оптимизирует режимы работы светофорных объектов, выполняя макро моделирование транспортного потока в течение малых интервалов времени с учетом возможности варьирования параметров планов. Возможность обеспечения оптимизации таких целевых функций, как увеличение процента прибытия, уменьшение продолжительности задержек, количества остановок и объема потребления топлива (в любом возможном их сочетании), а также снижение общих эксплуатационных затрат создается за счет учета при расчете значений продолжительности цикла, смещений и разделений. Возможности интерфейса и алгоритмов программы приведены на рисунке 10.

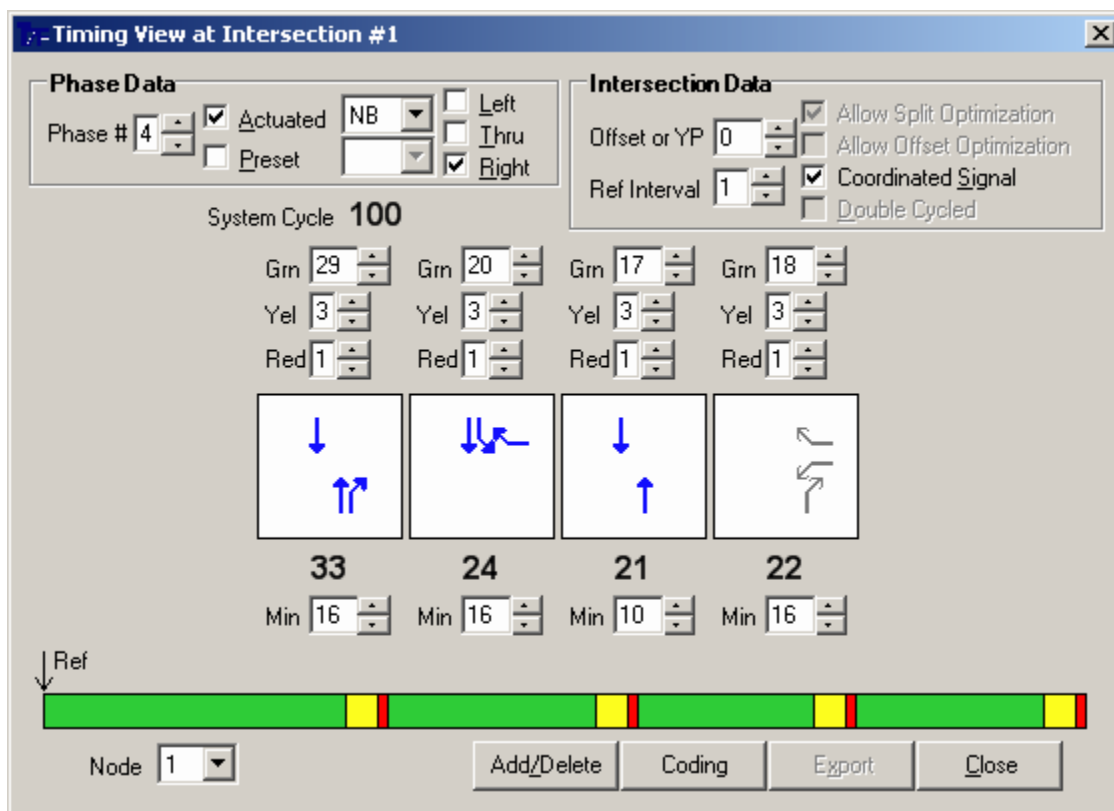


Рисунок 10 – Интерфейса программного пакета для конфигурирования «умных» светофоров

Среди уникальных возможностей Transyt-7FR следует назвать: способность анализировать сдвоенные циклы, множественные фазы зеленого света, нерегулируемые перекрестки, запрещенные и/или разрешенные повороты налево, ограничения пропускной способности, определяемые пользователем.

Среди программ, применяемых с целью определения оптимальных параметров светофорного регулирования, можно также отметить PASSER V, PRESYNCHRO, OSCADY [31 Левашев].

В настоящее время в России число программных продуктов в области организации дорожного движения на регулируемых пересечениях также увеличивается. Рассмотрим возможности отечественного программного продукта на примере программы СВЕТОФОР [3 Manual].

Программа СВЕТОФОР обеспечивает проектирование режимов жесткого регулирования при пофазном управлении движения (рисунок 11), а также оценку эффективности режимов регулирования.

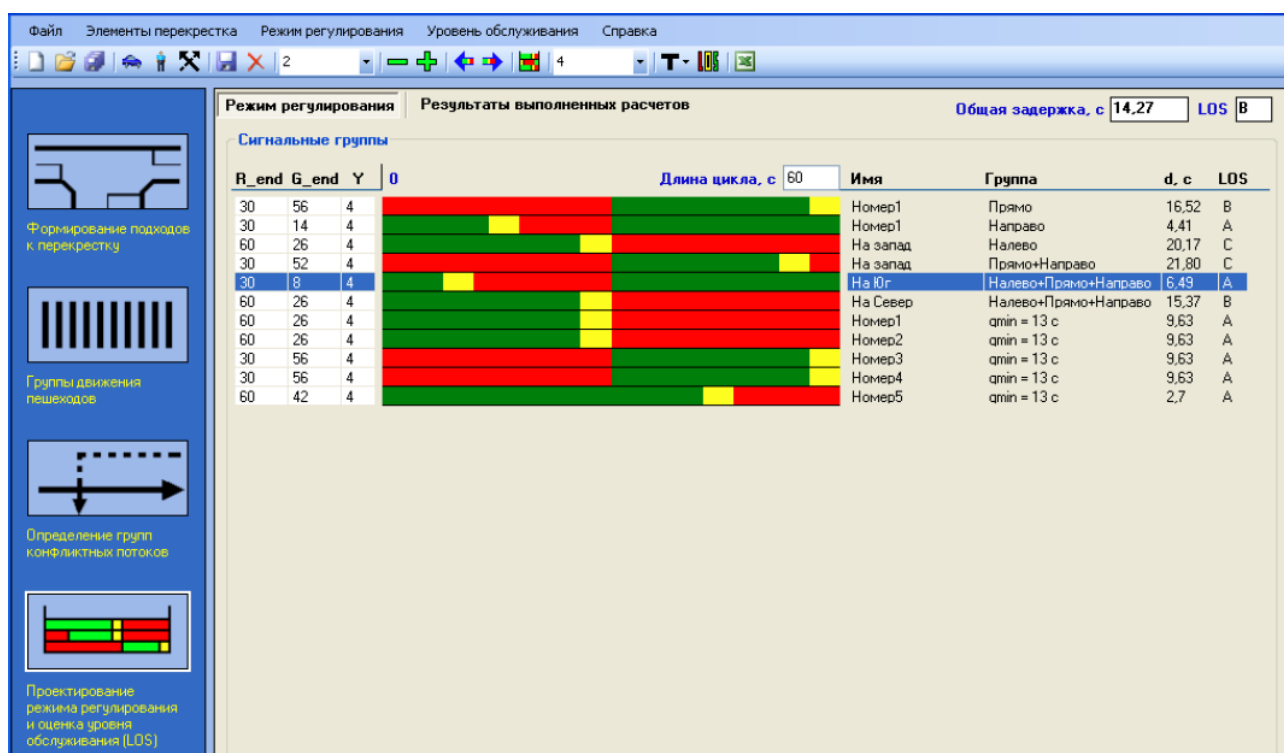


Рисунок 11 – Окно проектирования режима регулирования

Программа предоставляет расчет задержек регулирования на всех элементах регулируемого пересечения (полоса, группа движения, подход, перекресток в целом), позволяя минимизировать общую задержку за счет баланса фазовых коэффициентов.

В программе можно изменять такие параметры, как длительности цикла регулирования и основных тактов, потерянное время в начале и в конце фазы, количество фаз регулирования (до пяти фаз), интенсивности движения по всем направлениям на перекрестке, количество полос на каждом из подходов, их ширину и виды движения на них. Также представляется возможным учитывать влияние на движение транспорта, вызванное таким внешним фактором, как влияние предыдущего светофорного объекта на рассматриваемый перекресток.

2.8 Алгоритм нахождения оптимального цикла светофора

В рамках задачи требуется определить, при каких условиях перед светофором не будет скапливаться очередь. Рассмотрим математическую модель проезда транспортным потоком многополосного регулируемого перекрестка, базирующуюся на использовании теории систем массового обслуживания (СМО) с изменяющейся интенсивностью обслуживания. Такой подход предложен и изучен в работах [10][17]. Числом обслуживающих каналов m будет количество полос для проезда перекрестка в одну сторону ($m=1,2,3$).

Задача заключается в исследовании зависимости длины очереди от интенсивности входного потока, а также нахождения оптимального режима работы светофора при заданных интенсивностях входного потока автомобилей.

3 Описание разработанного программного обеспечения

3.1 Структура программного обеспечения

С учетом всех факторов, в качестве средств реализации требуемых программных модулей для решения поставленных задач были выбраны следующие программные продукты и технологии:

- Язык программирования C# и платформа .NET 4.0.
- .

3.2 Функционал программного обеспечения

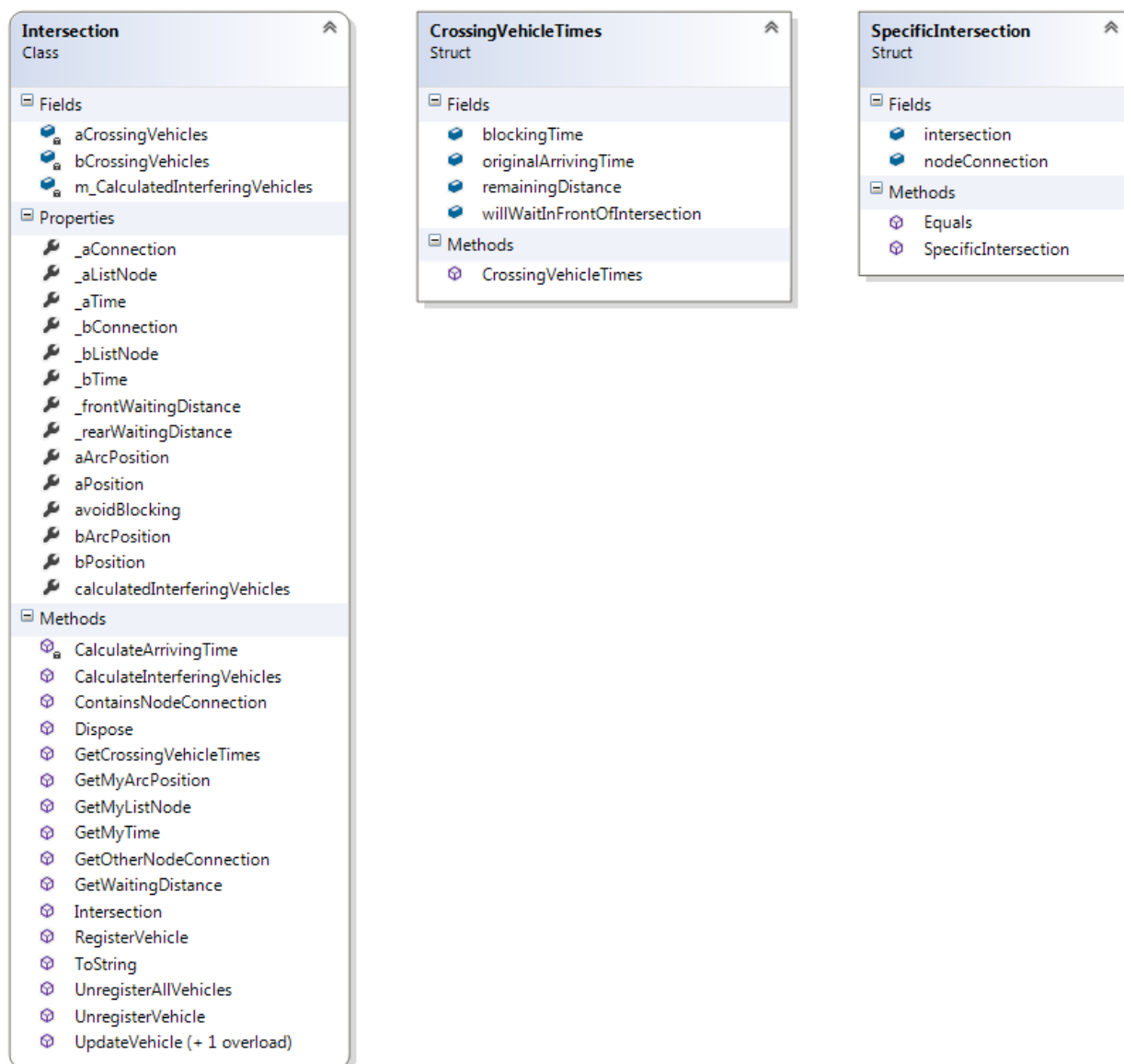


Рисунок 12 – Диаграмма класса Intersection (перекресток) и вспомогательных структур

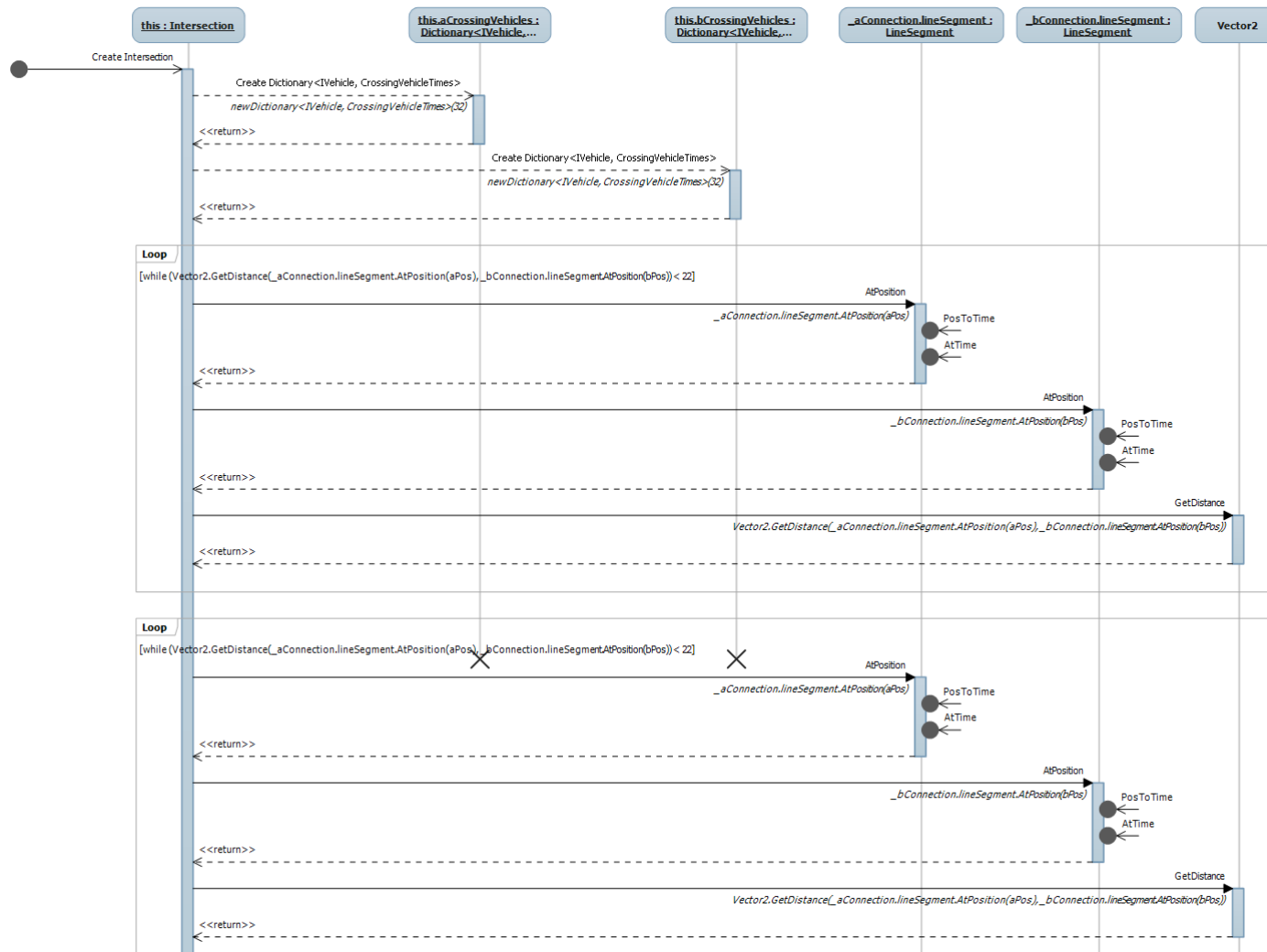


Рисунок 13 – Диаграмма последовательностей вызова конструктора класса Intersection (перекресток)

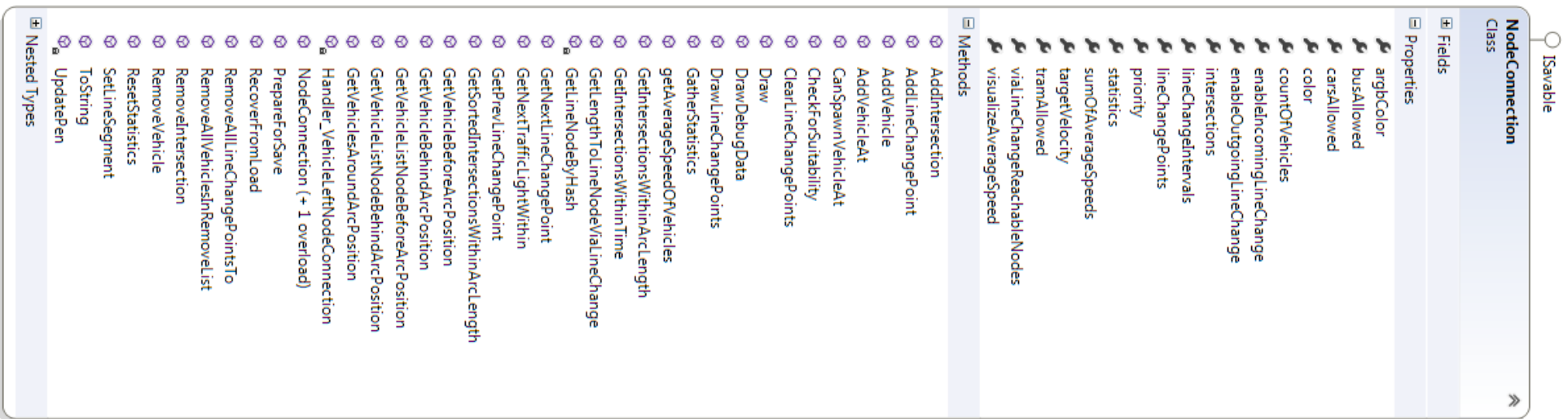


Рисунок 14 – Диаграмма класса NodeConnection (узловое соединение)

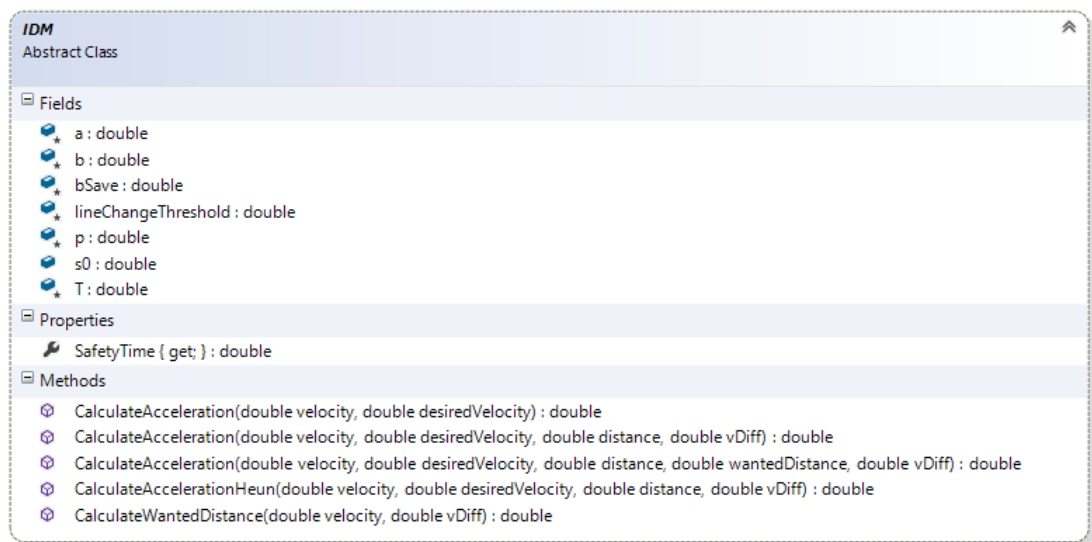


Рисунок 15 – Диаграмма класса IDM, реализующего модель «умного» водителя

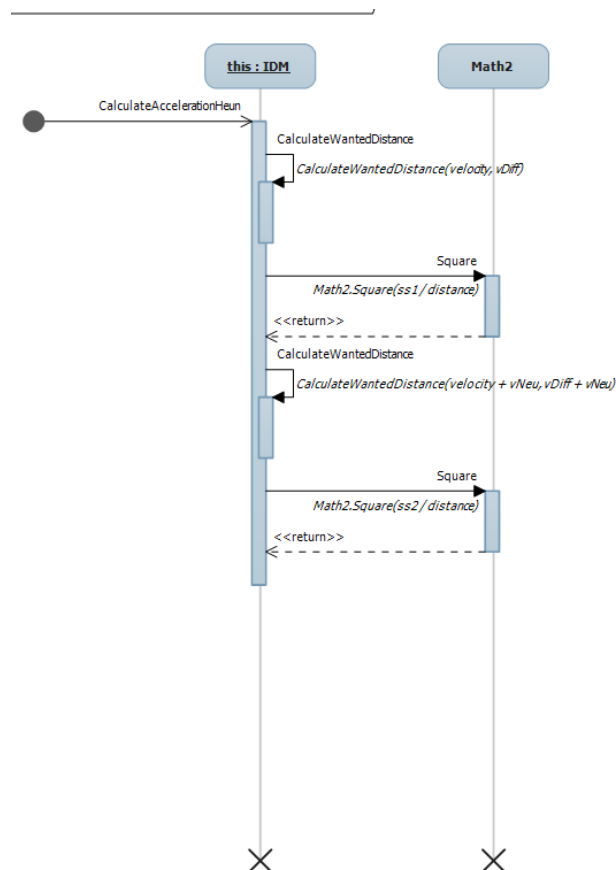


Рисунок 16– Диаграмма последовательности вызова метода CalculateAccelerationHeun (расчета свободного ускорения)

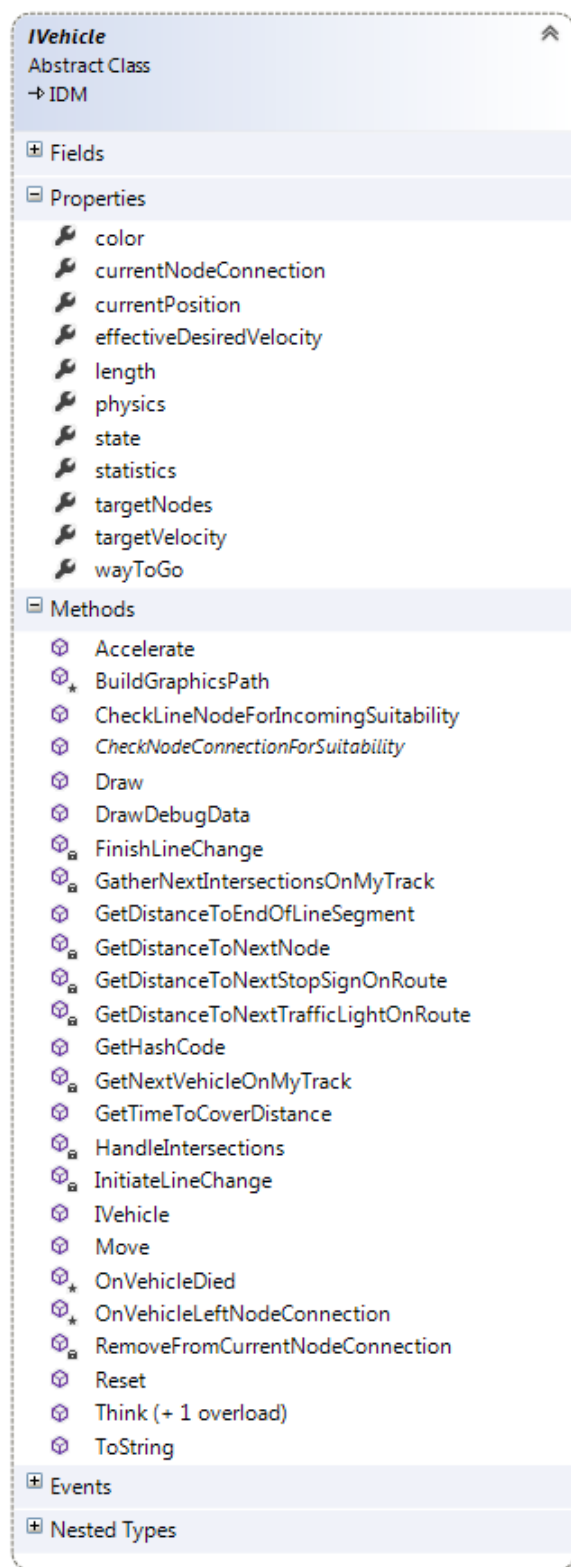


Рисунок 17 – Диаграмма класса IVehicle (транспортное средство)

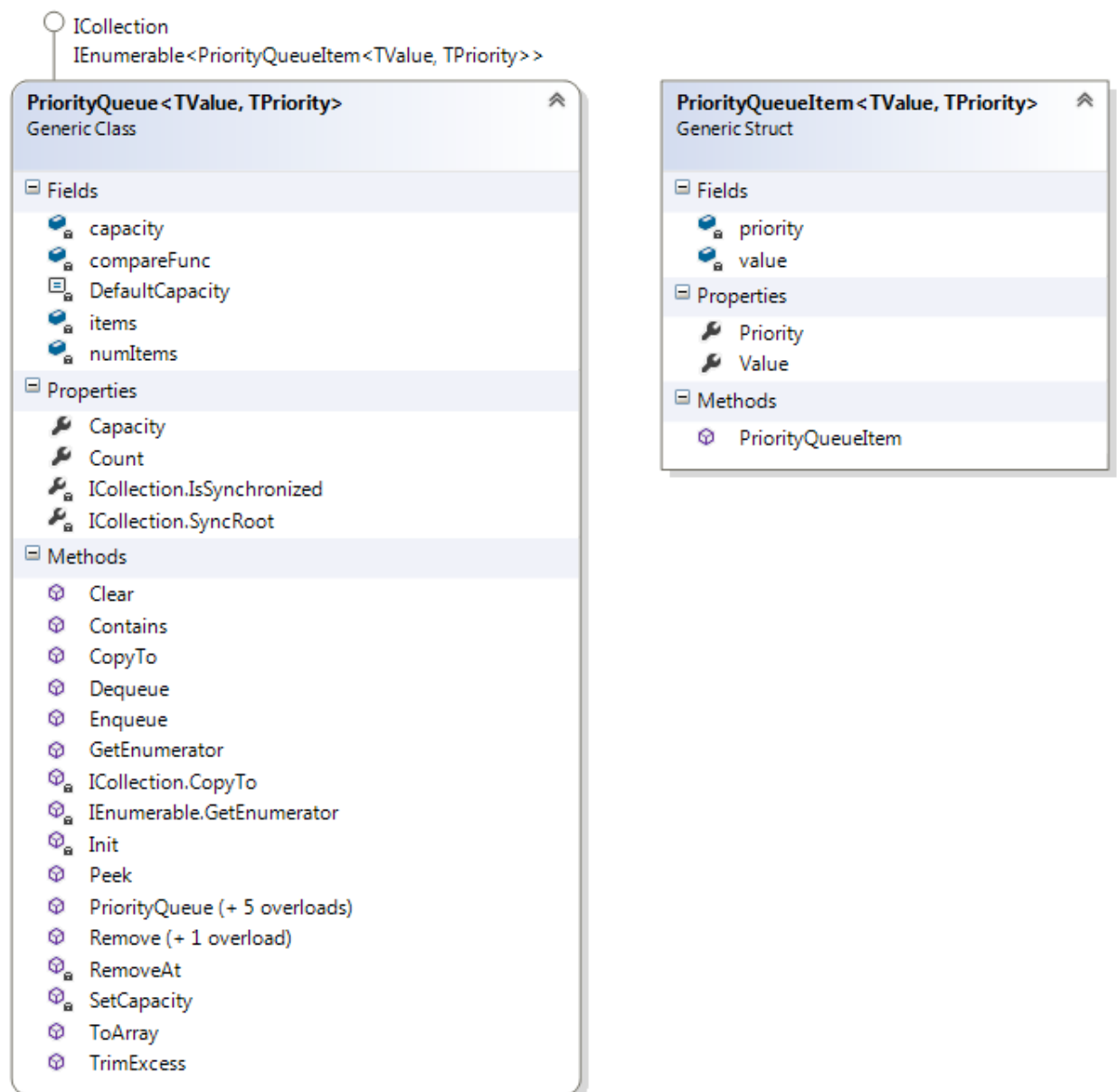


Рисунок 18 – Диаграмма классов PriorityQueue (приоритетная очередь) и PriorityQueueItem (элемент очереди)

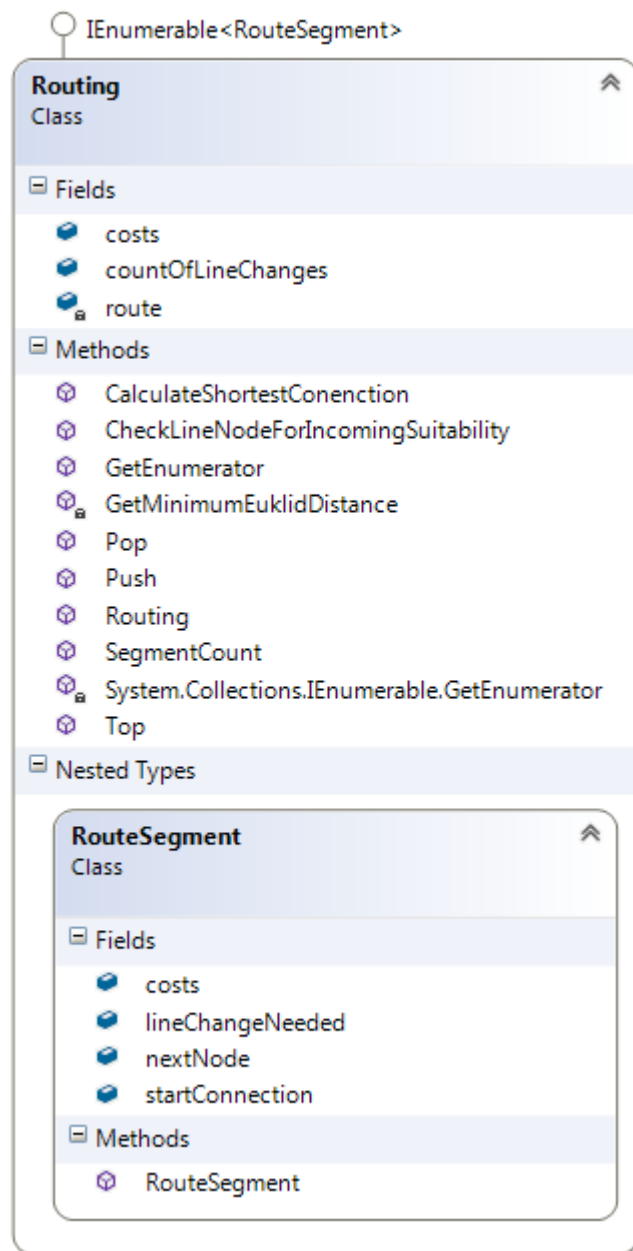


Рисунок 18 – Диаграмма класса Routing (маршрутизация)

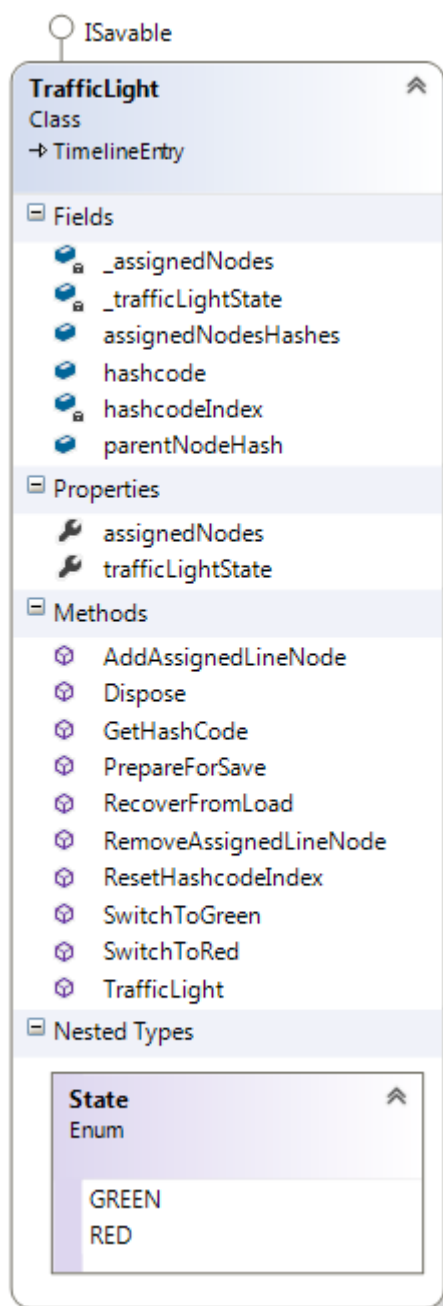


Рисунок 19 – Диаграмма класса TrafficLight (светофор)

3.1 Интерфейсная часть

Заключение

В ходе работы представлены методы проектирования и оценки эффективности режимов регулирования на пересечениях. Особое внимание уделено параметрам транспортного потока, которые необходимы при проектировании режимов регулирования. Рассмотрены методики оценки эффективности регулируемых пересечений, а также программные продукты, применяемые при проектировании режимов регулирования.

Цель данной работы была поставлена следующим образом: разработать метод нахождения оптимальных параметров светофора для заданных значений интенсивности входных потоков на перекрестке. В ходе выполнения работы была разработана программа моделирования транспортных потоков, которая позволяет задавать входные параметры (размеры перекрестка, число полос движения, интенсивности движения автомобилей) и получать все необходимые выходные параметры.

Разработана математическая модель движения транспорта на регулируемом перекрестке. Подробно описаны принципы построения и функционирования имитационной модели движения потоков через регулируемые перекрестки. Получены соотношения для длительностей фаз светофоров в зависимости от плотностей потоков транспортных средств, обеспечивающие минимальные длины очередей или минимальное время задержки автомобилей на перекрестке.

Список использованных источников

- 1 Завалищин Д.С. Исследование математической модели регулируемого перекрестка / Д.С. Завалищин, Г.А. Тимофеева // Труды Института математики и механики УрО РАН. Екатеринбург: 2009. – Т. 15, № 4. – С. 108-119.
- 2 Семенов В. В. Смена парадигмы в теории транспортных потоков / В. В. Семенов // Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН. – Москва: 2006. – 32 с.
- 3 Краткое руководство по применению программы Светофор (версия 2.0.2) // Транспортная лаборатория ИргТУ : [сайт]. – URL: http://transport.istu.edu/downloads/manual_ampel2.pdf (дата обращения 29.05.2016).
- 4 Швецов В.И. Основы моделирования транспортных потоков. / В.И. Швецов : [сайт]. – URL: <http://www.isa.ru/transnet/intro/Intro.pdf> (дата обращения 29.05.2016).
- 5 Автоматизированный пакет управления CO Artery // AGA Group Inc.: [сайт]. – URL: <http://www.againc.net/ru/production/its/programms/artery> (дата обращения 29.05.2016).
- 6 Пакет имитационного моделирования Aimsun // AGA Group Inc.: [сайт]. – URL: <http://www.againc.net/ru/production/its/programms/aimsun> (дата обращения 29.05.2016).
- 7 Оптимизационный пакет регулирования ДД Transyt-7FR // AGA Group Inc.: [сайт]. – URL: <http://www.againc.net/ru/production/its/programms/transyt> (дата обращения 29.05.2016).
- 8 Пакет имитационного моделирования дорожного движения PTV VISSIM // PTV Partner : [сайт]. – URL <http://ptv-vision.ru/produkty/vissim>

(дата обращения 29.05.2016).

9 Программный продукт PTV VISUM // PTV Partner: [сайт]. – URL <http://ptv-vision.ru/produkty/visum> (дата обращения 29.05.2016).

10 Ахмадинуров М.М. Оптимизация светофорного регулирования с помощью программы моделирования транспортных потоков / М.М. Ахмадинуров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». –2010. – №22 (198). – С. 26-30.

11 Алюшин, С.А. Модели, методы и программные средства построения сложных адаптивных систем дорожного движения : автореферат дис. канд. техн. наук : 05.13.11 / Алюшин Сергей Александрович; Москва, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»; науч. рук. Н. И. Ильинский. – Москва, 2011. – 22 с.

12 Ахмадеева, Р.З. Моделирование движения транспортных потоков [Электронный ресурс] / Р.З. Ахмадеева, В.Л. Дмитриев. Стерлитамакская государственная педагогическая академия им Зайнаб Биитшевой. – URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2012-conf-prikl-math-and-mod-41-43.pdf> (дата обращения: 29.05.2016)

13 Сирота А.А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем / А.А. Сирота. – Москва : Техносфера, 2006. - 256 с.

14 Кременец Ю.А., Печерский М.П., Афанасьев М.Б. Технические средства организации дорожного движения: учеб. для вузов / Ю.А. Кременец, М.П. Печерский, М.Б. Афанасьев. – Москва: ИКЦ «Академкнига» - М., 2005.-279 с.

15 Адаптивное управление как способ автоматизирования движения транспортных потоков на регулируемых перекрестках // Агентство инноваций и развития экономических и социальных проектов: [сайт]. – URL: <http://www.innoros.ru/innovation-idea28/ideas/adaptivnoe-upravlenie-kak-sposob->

avtomatizirovaniya-dvizheniya-transportnykh (дата обращения: 29.05.2016)

16 Кочерга В.Г. Технические средства современных автоматизированных систем управления дорожным движением / В.Г. Кочерга, Е.Е. Шаталова. – Ростов-на-Дону : РГСУ, 2011. – 108 с.

17 Агуреев И.Е. Исследование алгоритмов светофорного регулирования перекрестка при различных параметрах транспортного потока / И.Е. Агуреев, А.Ю. Кретов, И.Ю. Мацур // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. №7, Ч. 2. – С. 54-61.

18 Кретов А.Ю. Обзор некоторых адаптивных алгоритмов светофорного регулирования перекрестков / А.Ю. Кретов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2013. №7-2. – С. 61-67.

19 Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – Москва : Мир, 1976. – 166 с.

20 Кущенко, Л.Е. Повышение эффективности организации движения в городе на основе минимизации заторов.: дис. канд. техн. наук: 05.22.10 / Кущенко Лилия Евгеньевна. – Белгород, 2015. - 124 с.

21 Андронов, С.А. Разработка и исследование имитационной модели светофорного регулирования на основе нечеткой логики в среде AnyLogic / С.А. Андронов // Труды международной конференции ИММОД'2015. – 2015. – С. 443-449.

22 Review of Micro-Simulation Models // SMARTTEST Project : [сайт]. – URL: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/append3d.html> (дата обращения 29.05.2016).

23 Traffic Control Systems Handbook // FHWA Office of Operations : [сайт]. – URL: <http://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop06006/index.htm> (дата обращения 29.05.2016).

24 Петров В.В. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах : учеб. для вузов / В.В. Петров. – Омск :

СибАДИ, 2007. – 104 с.

25 Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice // Transportation research board. Ser/ NCHRP Synthesis 403. – Washington, D.C., US: 2010 – P. 1-105.

26 Rickert, M. Two lane traffic simulations using cellular automata / M. Rickert, K. Nagel, M. Schreckenberg, A. Latour // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 1996. – Vol. 231, № 4. – P. 534-550.

27 Treiber M. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations / M. Treiber, A. Hennecke, D. Helbing // Physical Review E. – 2000. – Vol. 62, № 2. – P. 1805-1824.

28 Osorio, C. A surrogate model for traffic optimization of congested networks: an analytic queueing network approach / C. Osorio, M. Bierlaire // Report TRANSP-OR. – 2009. – P. 1–23.

29 Бекмагамбетов М.М. Анализ современных программных средств транспортного моделирования / М.М. Бекмагамбетов, А.В. Кочетков // Исследования, конструкции, технологии. – 2012. – №6 (77). – URL: <http://www.aae-press.ru/f/77/25.pdf> (дата обращения 29.05.2016).

30 Посмитный Е.В. Методика адаптивного управления транспортными потоками высокой интенсивности в условиях города на основе мезомодели динамики с применением генетических алгоритмов / Е.В. Посмитный, М.И. Медовщиков // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – №84(10). – URL: <http://ej.kubagro.ru/2012/10/pdf/75.pdf> (дата обращения 29.05.2016).

31 Левашев А.Г. Проектирование регулируемых пересечений : учеб. пособие / А.Г. Левашев, А.Ю. Михайлов, И.М. Головных. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 210 с.

32 Михеева Т.И. Модели транспортных потоков в интеллектуальных

транспортных системах / Т.И. Михеева, С.В. Михеев, И.Г. Богданова // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 6. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11808> (дата обращения 29.05.2016)

33 Введение в математическое моделирование транспортных потоков / А.В. Гасников [и др.]. – Москва : Изд. МФТИ, 2010. – 362 с.

34 Наумова, Н.А. Теоретические основы и методы автоматизированного управления транспортными потоками средствами мезоскопического моделирования : дис. канд. техн. наук : 05.22.10 / Наумова Наталья Александровна; Краснодар, Кубанский государственный технологический университет; науч. рук. В.В. Зырянов. – Краснодар, 2015. – 331 с.

35 Семахин А.М. Программный комплекс моделирования транспортных и пешеходных потоков на регулируемом перекрестке / А.М. Семахин, М.А. Шульгин // Молодой ученый. Ежемесячный научный журнал. – 2013. – Т. 1, №7(54). – С. 42-44.

Приложение А.