

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ
ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

МОГОРАС АНДРЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТНЫМИ ПОТОКАМИ
МЕГАПОЛИСА НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И
ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ**

Специальность 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка
информации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2010

Работа выполнена на кафедре: "Математическое обеспечение систем обработки информации и управления" (МОСОИиУ) Московского государственного института электроники и математики (технического университета)

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Тюхов Борис Петрович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Фоминых Игорь Борисович;

кандидат технических наук
Тарасов Валерий Борисович;

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им.
В. А. Трапезникова РАН

Защита состоится “__” _____ 2010 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.133.01 Московского государственного института электроники и математики (Технический университет) по адресу: 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИЭМ (ТУ).

Автореферат разослан “__” _____ 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.133.01,
к.т.н., доцент _____ С.Е. Бузников

Общая характеристика работы

Актуальность работы

В настоящее время практически во всех мегаполисах темпы роста количества автомобилей значительно опережают темпы развитие улично-дорожной сети. Это порождает ряд проблем дорожного движения: транспортные заторы, снижение безопасности, загрязнение окружающей среды. В Москве эти проблемы усугубляются из-за исторически сложившейся радиально-кольцевой планировки города и разобщенности мест работы и проживания. В этих условиях начиная с 1990-х годов в развитых странах (США, Зап. Европа, Япония и др.) начали разрабатывать полностью автоматизированные системы дистанционного централизованного оперативного управления дорожным движением в режиме реального времени, получившие название интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Эксперты считают применение ИТС одним из наиболее перспективных способов решения перечисленных проблем дорожного движения.

Развитие ИТС сопровождается повышением уровня технической оснащенности транспортной инфраструктуры мегаполисов, разработкой более совершенных средств оперативного мониторинга, анализа и перераспределения транспортных потоков (ТП), а также развитием систем искусственного интеллекта. Это дает потенциал для создания ИТС, обладающих принципиально новыми возможностями управления дорожным движением. Однако для создания таких систем требуется проведение дополнительных теоретических исследований в области моделирования, анализа и прогнозирования ТП, выявления закономерностей влияния различных факторов и формализации знаний о предметной области.

Таким образом, актуальность данной работы обоснована необходимостью разработки новых информационно-технологических средств моделирования, прогнозирования, анализа и управления ТП, позволяющих повысить эффективность управления дорожным движением.

Цель работы: повышение эффективности оперативного управления дорожным движением путем создания и исследования свойств интеллектуальной транспортной системы, основанной на агентном моделировании и прогнозировании транспортных потоков.

Задачи исследования

1. Анализ моделей, методов и информационно-коммуникационных технологий, применяемых при управлении дорожным движением.
2. Разработка функциональной схемы управления ТП мегаполиса посредством ИТС.

3. Создание имитационной модели неоднородного ТП, позволяющей учитывать особенности поведения участников дорожного движения и нестандартные ситуации на дорогах.

4. Выбор математического аппарата и разработка методики анализа, прогнозирования динамики состояний и оптимизирующего управления ТП.

5. Создание структуры и баз знаний (БЗ) многоагентной ИТС, реализующей данную методику.

6. Программная реализация многоагентной ИТС.

7. Экспериментальная проверка работоспособности и анализ свойств и особенностей многоагентной ИТС.

Методы исследования основаны на использовании принципов системного подхода, методов оптимизации и нечеткой логики, а также теории систем искусственного интеллекта, теории модальных логик, теории множеств, теории ТП и теории графов.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

- функциональная схема управления ТП мегаполиса посредством ИТС;
- имитационная модель неоднородного ТП;
- математический аппарат и методика анализа, прогнозирования динамики состояний и управления ТП;
- структура и БЗ многоагентной ИТС, реализующей данную методику;
- результаты экспериментальной проверки и анализа свойств разработанной ИТС.

Научная новизна содержится в следующих результатах работы:

- функциональная схема управления ТП мегаполиса посредством многоагентной ИТС;
- имитационная модель неоднородного ТП на основе гетерогенных агентов и применения формализмов нечеткой временной логики, что позволяет учитывать особенности структуры ТП и поведения участников дорожного движения;
- методика структурного анализа, прогнозирования динамики состояний и управления ТП на основе интеллектуальных агентов, что повышает эффективность ИТС и делает ее устойчивой к нестандартным ситуациям и влиянию различных факторов;
- структура и БЗ многоагентной ИТС, отличительными особенностями которой является наличие прогнозирующих агентов (ПА), иерархически организованная система координации, а также моделирование различных типов поведения водителей в ТП.

Практическая полезность

Результаты работы позволяют повысить эффективность управления ТП мегаполиса, благодаря прогнозированию динамики их состояний, применению интеллектуальных агентов, эффективных алгоритмов и моделей, учитывающих особенности поведения участников дорожного движения.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается:

- корректностью использования математического аппарата и методов исследований;
- апробацией основных результатов работы;
- результатами проведенных экспериментов;
- сходимостью полученных данных с результатами других исследований и статистической информацией.

Реализация результатов

Полученные в диссертационной работе результаты были программно реализованы и использованы в учебном процессе МИЭМ при обучении студентов на кафедре "Математическое обеспечение систем обработки информации и управления" и в практической деятельности организации ООО «СМИЛИНК», работающей в области сбора, обработки и анализа информации о дорожном движении.

Апробация работы

Результаты работы докладывались в 2008 г. на XVI Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем», ИПУ, Москва; в 2005, 2006, 2007, 2008 и 2009 гг. на Ежегодной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, Москва; в 2005, 2006, 2007, 2008 и 2009 гг. на Международной студенческой школе-семинаре, Судак.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 научных работах, в том числе 2 - в журнале, включенном ВАК в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы и приложений. Основная часть работы изложена на 146 страницах, содержит 34 рисунка и 7 таблиц. Список литературы включает 105 наименований. Приложения содержат 8 рисунков и 6 таблиц.

Структура диссертационной работы представлена на рис. 1.

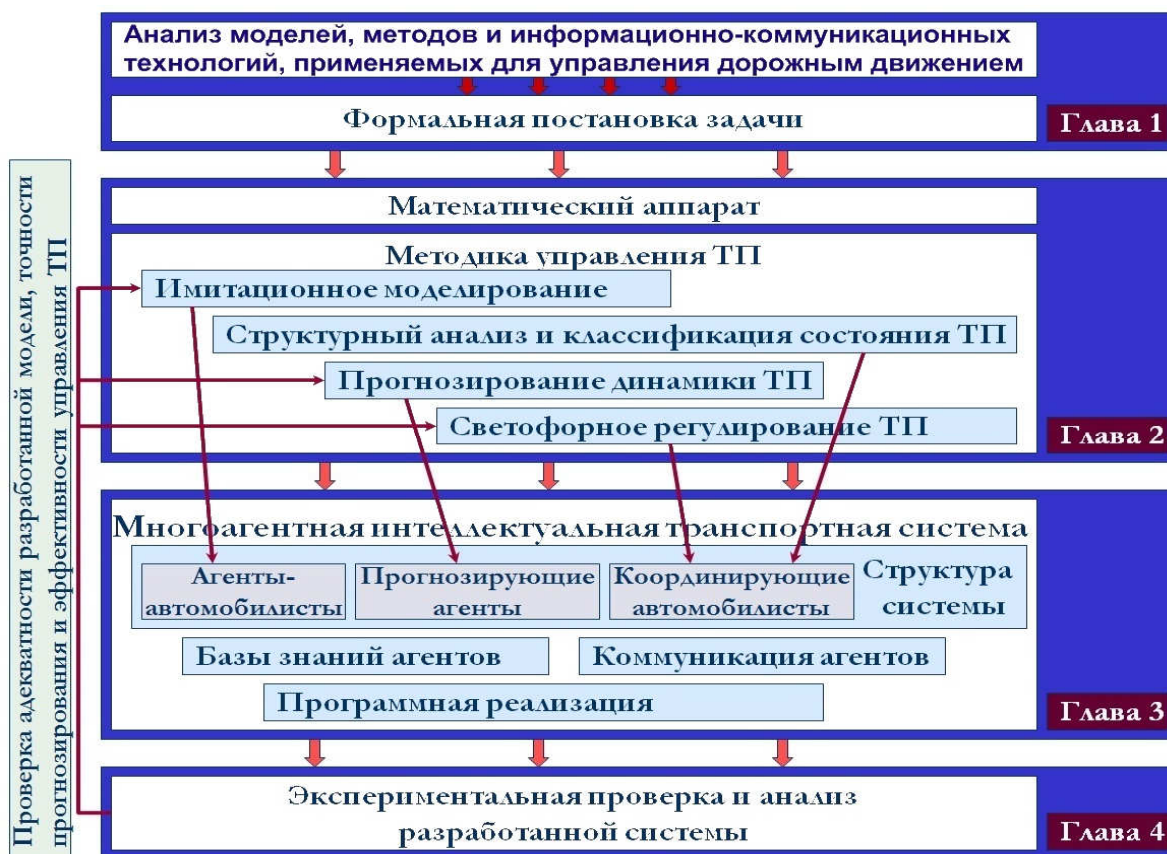


Рис. 1. Структура диссертационной работы

Содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности работы, определена цель, задачи и методы исследования, а также рассмотрены основные результаты и структура работы.

Глава 1

Проведен анализ предметной области, рассмотрены классы интеллектуальных транспортных систем (ИТС) и модели ТП, основанные на работах отечественных специалистов: В.В. Зырянова, В.Т. Капитанова, В.Г. Живоглядова, П.И. Пospelова, И.Р. Пригожина, В.В. Сильянова, и др.; зарубежных специалистов: Ф. Хейта, А. Дрю, Х. Иносэ и Т. Хамада, К.Даганзо и др.

Основные понятия

Интеллектуальные Транспортные Системы или ИТС (сокр. от англ. Intelligent Transport Systems and Services) — это системная интеграция современных информационных и коммуникационных технологий и средств автоматизации с транспортной инфраструктурой, транспортными средствами и пользователями, направленная на повышение эффективности управления дорожным движением и обеспечение безопасности и комфорта для его участников.

Транспортный поток (ТП) — совокупность транспортных средств, одновременно участвующих в движении на определенном участке улично-дорожной сети (УДС).

Основные параметры состояния ТП следующие:

$v(x,t)$ – скорость потока в точке x в текущий момент времени t ,

$\rho(x,t)$ – плотность потока: количество автомобилей на единицу длины дороги,

$q(x,t)$ – интенсивность потока, т.е. количество автомобилей пересекающих точку x за единицу времени, $q = Q(v,\rho)$.

Состав ТП - процентное соотношение в нем транспортных средств различного типа. В работе этот показатель определяется на основе статистического анализа общего количества автомобилей в данном регионе

Аналитические модели ТП делятся на три класса.

1) Модели-аналоги - движение транспортных средств уподобляется какому-либо физическому потоку (гидро- и газодинамические модели). Этот класс моделей называют макроскопическими.

2) Модели следования за лидером - основаны на наличии связи между перемещениями ведомого автомобиля и головного автомобиля. По мере развития теории в моделях этой группы учитывалось время реакции водителей, исследовалось движение на многополосных дорогах, изучалась устойчивость движения. Этот класс моделей называют микроскопическими.

3) Вероятностные модели - транспортный поток рассматривается как результат взаимодействия транспортных средств на элементах транспортной сети. В значительной степени этот класс моделей основан на теории массового обслуживания.

Также применяют имитационное моделирование дорожного движения. Преимущество имитационных моделей заключается в том что, они позволяют учитывать индивидуальное поведение активных элементов в ТП. Наиболее универсальным и перспективным средством реализации имитационной модели ТП являются программные агенты.

Агент - это система, обладающая следующими свойствами:

- 1) активностью - агенты могут осуществлять целенаправленное поведение, проявляя при этом инициативу;

- 2) реактивностью - агенты воспринимают состояние окружающей среды и реагируют на ее изменения;

- 3) автономностью - агенты действуют без непосредственного участия человека и могут в некоторых пределах сами управлять своими действиями;

- 4) социальными чертами - агенты взаимодействуют с другими агентами (и, возможно, человеком) посредством некоторого языка коммуникации;

- 5) целенаправленностью - агенты имеют собственные источники мотивации.

Интеллектуальными являются агенты, поведение которых рационально, т.е. основано на рассуждениях.

Проведенный анализ ИТС показал, что в этой области разработано много программных продуктов, которые достаточно успешно решают частные задачи управления дорожным движением, однако их эффективность при решении задачи в целом в условиях перегруженности транспортных сетей и наличия других проблем дорожного движения остается недостаточной. Это связано с рядом трудностей, к которым относятся:

- высокая сложность и многокритериальность решаемой задачи;
- ограниченная область применения ИТС;
- нестабильность, неоднородность и неполная наблюдаемость ТП;
- значительная непредсказуемость поведения участников дорожного движения;
- зависимость от влияния случайных факторов и флуктуаций, связанных с сезонами, выходными и праздничными днями и т. п.;
- неточность реализации при осуществлении управляющих воздействий.

Вместе с тем, потенциал возможностей ИТС в настоящее время далеко не исчерпан, и это направление остается перспективным для решения различных проблем дорожного движения.

На основе проведенного анализа предметной области сформулированы следующие основные принципы управления ТП мегаполиса посредством ИТС:

- применение распределенных систем, основанных на знаниях;
- статистический анализ динамики загрузки транспортной сети;
- использование нечетких представлений;
- прогнозирование динамики состояний ТП;
- учет поведения участников дорожного движения;
- структурная и функциональная иерархия координирования ТП;
- использование современных и перспективных информационно-коммуникационных технологий.

Сформулирована постановка задачи управления ТП посредством ИТС.

Требуется разработать интеллектуальную транспортную систему, основанную на применении интеллектуальных гетерогенных агентов, нечеткого логического вывода и формализмов временной логики, для решения задачи управления ТП мегаполиса, включающей в себя:

- имитационное моделирование ТП;
- структурный анализ и классификацию состояний ТП;
- прогнозирование динамики состояний ТП для заданного временного интервала;
- выработку и реализацию управляющих воздействий в рамках структурной и функциональной иерархии координирования ТП.

Объектом управления в разработанной системе является множество ТП $F=\{F_k\}$, $k=1,\dots,N$, которые распределены на улично-дорожной сети (УДС) мегаполиса и представлены имитационной моделью.

Состояние ТП F_k в момент времени t описывается вектором состояния $V_k=V(F_k,t)$, который рассчитывается на основе следующих параметров ТП: плотность ρ , интенсивность q , скорость v и состав h .

Анализ состояния ТП, прогнозирование их динамики, а также выработка и реализация управляющих воздействий осуществляются системой интеллектуальных агентов.

Целью управления является оптимизация двух критериев качества дорожного движения, а именно максимизация средней скорости ТП $v_{cp} = V(v, h)$ и минимизация количества транспортных заторов $kz_{np} = kz(\rho, q)$.

Глава 2

Содержит описание функциональной схемы, математического аппарата и методики управления ТП на основе нечеткого вывода и применения формализмов временной логики.

Функциональная схема управления ТП посредством ИТС имеет вид:

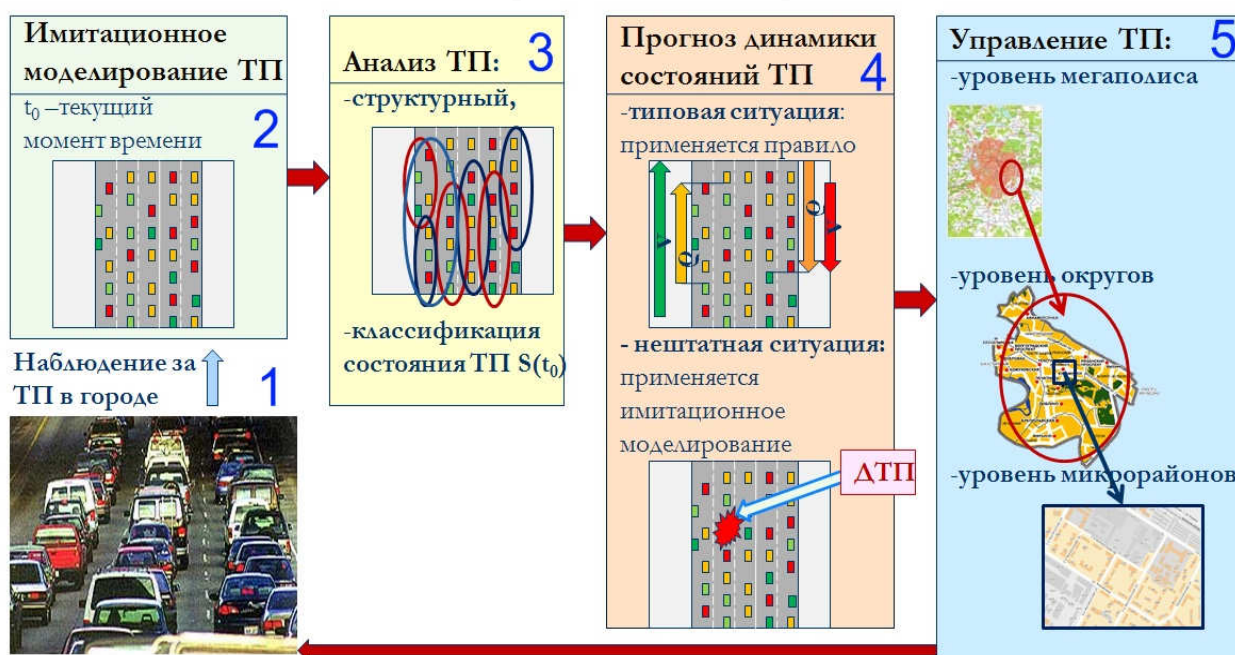


Рис. 2. Функциональная схема управления ТП

Цикл работы системы

1) **Получение информации о ТП** с помощью видеонаблюдения и фиксации в текущий момент времени t основных параметров ТП в мегаполисе. Принимается допущение о возможности получения указанной информации в каждый момент времени, поэтому задачи, связанные с мониторингом ТП в данной работе не рассматриваются.

2) **Имитационное моделирование ТП.** Производится отдельно по каждому району на основании данных наблюдения. Разработанная имитационная модель ТП на участке УДС формулируется так:

дорога содержит $N_{\text{п}}$ полос;

каждая полоса разбивается на $N_{\text{кл}}$ клеток;

в каждый момент времени t на одной клетке может находиться одно и только одно автотранспортное средство (АТС) A_m ;

Ширина всех АТС равна 1 клетке;

Общее число АТС в потоке равно M .

Вводится L классов АТС, которые различаются следующими параметрами:

- габаритной длиной (от 1 до 3 клеток);

- типом транспорта (легковой, грузовой или пассажирский);

- скоростью v в свободно движущемся потоке (усредненное значение скорости движения для данного класса АТС при отсутствии помех на дороге);

- типом поведения, отражающим особенности индивидуального поведения водителей в ТП и задаваемым множеством логических правил;

- долей данного класса АТС α_i от общего числа автомобилей в ТП (зависит от района города): $\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_L = 1$.

Модель содержит элементы транспортной инфраструктуры, влияющие на ТП, такие как светофоры, дорожные знаки и т.д. Также учитывается влияние на ТП таких факторов, как условия видимости, погодные условия, пешеходы и ограничения пропускной способности УДС.

В течение отрезка времени $\Delta t = 2$ мин в системе моделируется дорожное движение отдельно по каждому району на основе правил поведения участников дорожного движения и статистических данных о распределении ТП.

3) **Анализ** результатов имитационного моделирования ТП включает 2 этапа.

А) Структурный анализ ТП. Выделение групп АТС и подпотоков, которые в дальнейшем рассматриваются как один объект, что упрощает задачу согласования ТП с фазами сигналов светофора и друг с другом. В результате структурного анализа для каждого ТП F_k , который движется на определенном участке УДС p_k , определяется вектор состояния $V(F_k) = (w_k, \Delta w, L_{k,t}, @_L, R_k, \Delta R)$, где

$w_k = w_k(\rho, t)$ – процентное отношение суммарной площади (в клетках) движущихся в потоке АТС к общей площади p_k , где ρ – плотность F_k ;

$\Delta w = w_k(\rho, t) - w_k(\rho, t - \Delta t)$ – изменение w_k за $\Delta t = 2$ мин;

$L_{k,t} = \square \{pf_i: PF_i \square F_k\}$ – временной интервал, за который весь поток проходит p_k , где $PF_i \square F_k$ – подпотоки, составляющие F_k , а pf_i – соответствующие им временные интервалы;

$@_L$ – изменение $L_{k,t}$ за $\Delta t = 2$ мин;

R_k – коэффициент затрудненности движения в данном ТП;

$\Delta R = R_k(t) - R_k(t - \Delta t)$ – изменение R_k за $\Delta t = 2$ мин.

Б) Классификация состояний ТП путем сопоставления значений параметров, характеризующих состояние ТП с набором «эталонов», соответствующих определенному классу состояний C_i . Отнесение состояния ТП F_k в момент времени t к одному из классов состояний происходит на основе правил нечеткой логики, имеющих вид:

$(w_k = \alpha_{i1}) \square (\Delta w = \alpha_{i2}) \square (L_{k,t} = \alpha_{i3}) \square (@_L = \alpha_{i4}) \square (R_k = \alpha_{i5}) \square (\Delta R_k = \alpha_{i6}) \rightarrow C_i; \varphi_i(C_i)$

где $\varphi_i(C_i)$ – коэффициент определенности i -го правила.

4) **Прогнозирование динамики состояний ТП:** осуществляется на основе нечеткого логического вывода. Производится последовательное прогнозирование состояний ТП для каждого участка УДС с шагом прогнозирования $\Delta t_{пр} = 2$ мин в течение интервала времени T продолжительностью 60 мин.

При этом возможно 2 случая.

А) Типовая ситуация: в момент времени t состояние ТП F_k на данном участке транспортной сети, а также входящих в него ТП F_{a1}, \dots, F_{an} и исходящих из него ТП F_{c1}, \dots, F_{cm} можно отнести к определенным классам состояний $C_k, C_{a1}, \dots, C_{an}, C_{c1}, \dots, C_{cm}$ (рис. 3). В этом случае применяются нечеткие прогнозирующие правила, которые имеют вид:

$(C_k = \alpha_{i1}) \square (C_{a1} = \alpha_{i2}) \square \dots \square (C_{an} = \alpha_{ij}) \square (C_{c1} = \alpha_{ij+1}) \square \dots \square (C_{cm} = \alpha_{iK}) \rightarrow C_k^{op}; \varphi_i(C_k^{op})$

где i – номер правила, $\alpha_{ij} \square C$,

$\varphi_i(C_k^{op})$ – коэффициент определенности i -го правила,

C_k^{op} – ориентировочное прогнозируемое состояние ТП в момент времени $t + \Delta t_{пр}$.

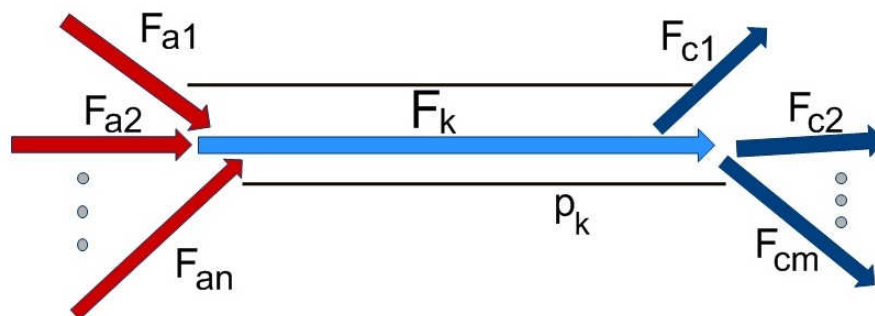


Рис. 3. Схема прогнозирования для типовой ситуации

Нечеткий вывод осуществляется по алгоритму Мамдани и дает ориентировочный прогноз состояния ТП F_k в момент времени $t + \Delta t_{пр}$.

Далее находится уточненный прогноз, который учитывает поправки, связанные с влиянием следующих факторов:

- 1) приток/отток АТС с прилегающих территорий в течение интервала времени $(t, t + \Delta t_{пр})$;
- 2) последствия управляющих воздействий;

- 3) погодные условия и видимость на дорогах;
- 4) пешеходы;
- 5) ограничения пропускной способности.

Для определения степени влияния перечисленных факторов вводятся соответствующие нечеткие лингвистические переменные: $N_{\text{прил}}$, $N_{\text{ув}}$, $N_{\text{пог}}$, $N_{\text{пеш}}$, $N_{\text{огр}}$, и применяются нечеткие правила вида:

$$(C_k^n = \alpha_{ij}) \square (N_{1k} = N_{\text{прил } i}) \square (N_{2k} = N_{\text{ув } i}) \square (N_{3k} = N_{\text{пог } i}) \square (N_{4k} = N_{\text{пеш } i}) \square (N_{5k} = N_{\text{огр } i}) \rightarrow C_k^n; \quad \varphi_i(C_k^n)$$

где i - номер правила;

$\varphi_i(C_k^n)$ - коэффициент определенности i -го правила,

C_k^n - окончательное прогнозируемое состояние ТП F_k в момент времени $t + \Delta t_{\text{пр}}$.

Б) Нештатная ситуация (ДТП, локальное запрещение проезда и т.п.) означает, что нет правила, описывающего такую ситуацию. В этом случае прогнозируемое состояние C_k^n рассчитывается на основе имитационного моделирования дорожного движения на данном участке.

5) **Управление ТП** осуществляется на нескольких уровнях:

- на уровне мегаполиса путем назначения приоритетов каждому из районов по степени напряженности дорожного движения, а также коэффициентов, соответствующих критериям качества управления ТП;

- на уровне округов, путем назначения более высокого приоритета ТП в тех участках УДС, где движение наиболее затруднено и более низкого приоритета ТП в тех участках УДС, где имеется свободный ресурс пропускной способности;

- на уровне отдельных районов, путем перераспределения ТП следующими способами.

А) Координирование участников дорожного движения, которым предлагается оптимальный (с учетом прогноза) маршрут следования до их цели через наименее загруженные улицы. Благодаря этому они быстрее достигают своей цели, и уменьшается нагрузка на участки, имеющие более высокий приоритет.

Б) Светофорное регулирование (СР). Осуществляется на основе согласования движения групп АТС с фазами сигналов светофора. Преимущество отдается ТП, которым назначен более высокий приоритет.

В работе предложено два режима работы светофоров:

- режим ликвидации транспортных заторов (RS_{tz}), основанный на подборе таких фаз разрешающего и запрещающего сигналов светофора, при которых достигается наилучшая пропускная способность на данном участке УДС;

- режим оптимизации движения ТП (RS_{gw}) путем создания «зеленых волн» («green wave»), т.е. согласования времени проезда перекрестков группами АТС с фазами разрешающего сигнала светофоров.

В) Распределение дополнительных ресурсов, таких как реверсивные полосы, средства ликвидации последствий аварий и т.д.

Далее весь цикл работы системы повторяется.

Разработанная методика имеет следующие преимущества:

- повышает эффективность оперативного управления благодаря прогнозированию динамики состояний ТП с учетом влияния нештатных ситуаций, последствий управляющих воздействий и других факторов;
- позволяет учитывать нестационарность и стохастичность ТП;
- снижает вычислительную сложность по сравнению с другими методами, что дает возможность применять ее при оперативном управлении ТП в режиме реального времени.

Глава 3

Содержит описание структуры, БЗ и программной реализации разработанной многоагентной ИТС (МАИТС).

МАИТС формально описывается так:

$$\text{МАИТС} = (\mathcal{A}, E, O, \text{ACT}, F, St, Y) \quad (3.1)$$

$\mathcal{A} = \{A, \Pi, K\}$ - множество агентов; $A = \{Aa_1, \dots, Aa_M\}$ - множество агентов-автомобилистов (АА), $\Pi = \{Pa_1, \dots, Pa_N\}$ - множество прогнозирующих агентов (ПА), $K = \{Ka_1, \dots, Ka_F\}$ - множество координирующих агентов (КА);

$E = (p_1, \dots, p_N, U_E, V_E)$ - среда функционирования агентов, p_i - элемент УДС, $p_i \in A(R) \in B(R)$, $A(R)$ - множество вершин графа R , $B(R)$ - множество ребер графа R , R - взвешенный направленный граф, соответствующий УДС города, U_E - множество связей, между элементами множества $\{p_1, \dots, p_N\}$, V_E - множество параметров, характеризующих свойства УДС;

O - множество отношений между агентами;

$\text{ACT} = \text{ACT}_A \cup \text{ACT}_\Pi \cup \text{ACT}_K$ - множество возможных действий агентов, ACT_A - множество действий агентов $Aa \in A$, ACT_Π - множество действий агентов $Pa \in \Pi$, ACT_K - множество действий агентов $Ka \in K$;

F - множество коммуникативных актов, используемых при взаимодействии агентов;

ST - множество состояний среды, $ST = ST(E) = \{s(p_1), \dots, s(p_N)\}$, $s_t(p_i) = \{V_i, C_i, M_i\}$ для $p_i \in R$, где V_i - вектор состояния ТП F_i движущегося на p_i , C_i - класс состояния ТП F_i , M_i - множество факторов, влияющих на ТП;

Y - множество законов функционирования среды.

AGENT - блок «агент», определяемый следующим образом: AGENT - блок «агент», определяющий мотивацию выбора целей, характер и последовательность выполнения действий;

MEM - блок «память», содержащий текущую цель агента, хронологию совершенных действий, последовательность запланированных действий и сообщения, полученные от других агентов;

ENV - множество действий, которые агент может выполнить;



Рис. 4. Структурная схема многоагентной ИТС

В системе действуют три класса агентов.

1) Координирующие агенты (КА) - обеспечивают согласование действий других агентов и разрешение конфликтных ситуаций, реализуют управление ТП, а также взаимодействуют с другими агентами для совместного решения конкретных задач. Множество КА делится на 3 подкласса, соответствующих уровням управления, и имеет древовидную иерархическую структуру (рис. 5).



КА Ka_1 определяет управление ТП в рамках района 1-го уровня, т.е. всего мегаполиса, назначая коэффициенты, соответствующие критериям качества управления.

КА Ka_2^i определяет управление в рамках района 2-го уровня (округа) Ra_2^i путем назначения каждому ТП F_k степени важности vf_k и коэффициента

перераспределения kpf_k . Ka^2_i в каждый момент времени t осуществляет максимизацию функционала $F^i_{упр}(t)$:

$$F^i_{упр}(t) = Max V_i \left(\frac{v^*_{cp}(t) - v_{cp}(t)}{v^i_{max}} \right) + Min Z_i \left(\frac{N^i_{i\partial}(t) - N^*_{i\partial}(t)}{N^i_{max}} \right)$$

где $Max V_i$, $Min Z_i$ – коэффициенты, заданные КА Ka^1_i ,

v^i_{max} – статистический максимум средней скорости ТП в районе Ra^2_i ,

N^i_{max} – число ТП в районе Ra^2_i ,

$v_{cp}(t)$ – средняя скорость ТП в момент времени t при отсутствии управления ТП,

$v^*_{cp}(t)$ – средняя скорость ТП в момент времени t при управлении ТП,

$N_{np}(t)$ – число ТП в районе Ra^2_i в момент времени t находящихся в состоянии затора при отсутствии управления ТП,

$N^*_{np}(t)$ – число ТП в районе Ra^2_i в момент времени t находящихся в состоянии затора при управлении ТП.

КА 3-его уровня Ka^3_j производит структурный анализ и классификацию состояний ТП, ставит задачи для ПА, взаимодействует Ka^2_i и осуществляет непосредственную реализацию управляющих воздействий на ТП. На рис. 6 представлена последовательность действий, выполняемых КА Ka^3_j за один цикл управления.



Рис. 6. Схема действий КА 3-го уровня

2) Агенты-автомобилисты (АА) – делятся на подклассы, соответствующие классам АТС и различаются физическими параметрами и правилами БЗ, которыми пользуется агент при выборе маршрута и вариантов поведения. Общая схема действий АА, выполняемых за один такт моделирования представлена на рис 7:



Рис. 7. Схема действий АА

3) Прогнозирующие агенты (ПА) - осуществляют прогнозирование динамики состояний ТП для заданного КА временного интервала $T = (t_0, t_k)$. Схема действий ПА представлена на рис 8. Прогноз при взаимодействии ПА друг с другом и с КА.



При программной реализации МАИТС использованы несколько видов программного обеспечения (ПО): пакеты AnyLogic 5.0 и Matlab, а также разработанный специально для поддержки применяемого в системе математического аппарата набор внешних приложений, написанных на языке java. Структура ПО системы представлена на рис. 9.



Рис. 9. Структура ПО разработанной системы

Программная реализация разработанной МАИТС позволяет использовать преимущества языка Java (технология объектно-ориентированного программирования, библиотеки и классы Java и т.д.) и при этом поддерживает необходимые для интеллектуальной системы компоненты: БЗ и машину логического вывода.

На основании изложенного можно заключить, что МАИТС:

- является распределенной системой, основанной на знаниях;
- учитывает особенности поведения участников дорожного движения;
- использует нечеткие представления структуры и динамики ТП;
- использует статистическую информацию о загрузке транспортной сети;
- прогнозирует динамику состояний ТП;
- использует структурную и функциональную иерархию координирования ТП;
- использует современные информационно-коммуникационные технологии.

МАИТС соответствует сформулированным в 1-ой главе принципам управления ТП мегаполиса и реализует полученную во 2-ой главе методику моделирования, анализа, прогнозирования и управления ТП.

Глава 4 описывает экспериментальную проверку адекватности МАИТС, анализ результатов эксперимента, а также свойств и особенностей разработанной системы.

МАИТС при определенных допущениях реализует управление ТП для нескольких районов Москвы. Методика ее экспериментальной проверки включает следующие этапы.

1. Имитационное моделирование дорожного движения в районах 1-ой Тверской-Ямской улицы (Район 1), проспекта Мира (Район 2) и Рязанского проспекта (Район 3).

2. Проверка адекватности разработанной имитационной модели на аналитических дифференциальных макромоделях ТП. Проверка проводится путем сопоставления полученных в результате имитационного моделирования значений плотности и скорости ТП с результатами расчетов этих параметров при сходных начальных данных, полученными на основе известных аналитических моделей Пейна и Кернера-Конхойзера.

3. Прогнозирование динамики состояний ТП на временном интервале T . Ошибка прогнозирования ΔP равна отношению количества $N_{\text{ош}}$ ошибочно определенных состояний к общему количеству прогнозируемых состояний $N_{\text{об}}$.

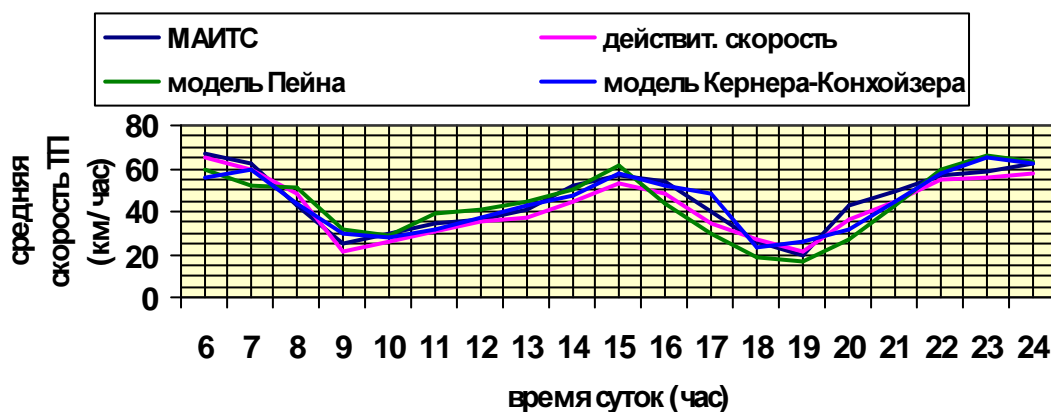
4. Анализ эффективности управления и ее зависимости от величины α_{AA} (доли AA, обладающих обратной связью с КА), которая при разных экспериментах составляет 10%, 25%, 50% или 100% от общего числа AA. Эффективность управления характеризуется коэффициентом увеличения средней скорости β_v и коэффициентом уменьшения заторов β_z .

Были проведены 54 эксперимента (18 по каждому району) для разных дней недели и времени суток, что позволило испытать МАИТС на всем диапазоне возможных значений исходных данных.

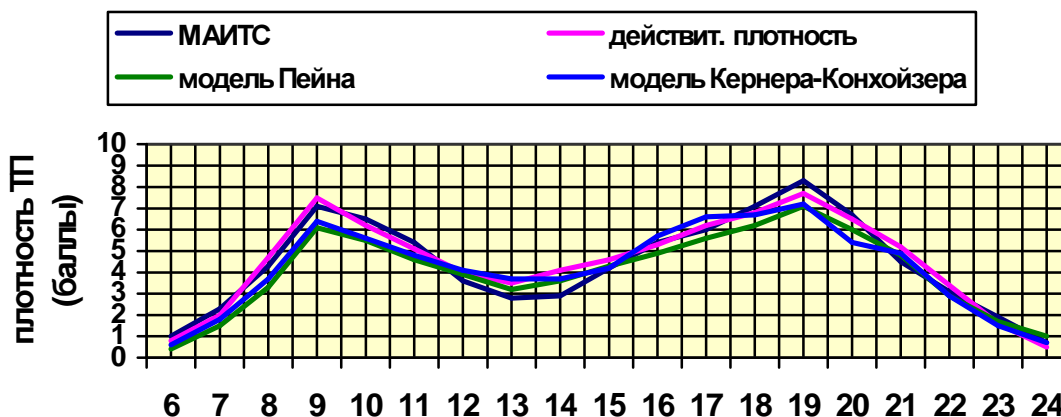
Проверка разработанной имитационной модели (1-ый и 2-ой этапы эксперимента) показала, что погрешность имитационного моделирования ТП составляет порядка 4-12%, т.е. не превосходит погрешности известных аналитических моделей Пейна и Кернера-Конхойзера, причем в часы пик точность моделирования ТП в МАИТС даже превосходит точность перечисленных моделей.

Сравнение результатов по одному из районов, полученных с помощью разных моделей, приведены на следующих графиках:

Изменение средней скорости ТП в течение суток



Изменение плотности ТП в течение суток



Погрешность прогнозирования (3 этап эксперимента) согласно результатам экспериментальной проверки приведена в таблице 1:

Δt (мин)	Погрешность прогнозирования в МАИТС (%)		
	Район 1	Район 2	Район 3
10	3.2-9.1	5.3-10.2	6.5-11.5
20	9.1-15.1	9.8-14.4	13.1-18.7
30	12.5-19.0	13.1-20.6	14.9-21.4
60	17.9-21.6	18.7-25.4	20.1-28.1

Также исследовано влияние на точность прогнозирования следующих факторов:

- = флуктуации, связанные с праздничными и выходными днями, часами пик и т.д.

Результаты проведенных экспериментов показали, что перечисленные факторы увеличивают погрешность прогнозирования на 4-23%.

Признаками ошибки прогнозирования состояний ТП являются:

- = нестабильность статистической информации, используемой ПА;
- = ошибка отнесения прогнозируемого состояния ТП к определенному классу состояний;
- = влияние на дорожное движение побочных факторов, влияние невозможно предсказать.

Самым важным критерием работоспособности МАИТС является эффективность управления ТП, осуществляемого КА. В таблице 2 приведены экспериментальные данные об эффективности управления ТП в зависимости от величины α_{AA} .

Эффективность управления ТП в МАИТС β_v (%)	β_3 (%)
10	4.9-8.2
	6.1-10.3

25	12.4-18.4	12.6-23.1
50	10.9-24.6	12.3-19.0
100	4.2-12.0	7.1-14.3

Несмотря на то, что следование инструкциям КА является необязательным для АА, когда доля АА, обладающих обратной связью с КА, достигает 100%, ясно прослеживается тенденция к снижению эффективности управления. Это объясняется тем, что число АА, желающих использовать свободные ресурсы пропускной способности УДС, оказывается слишком велико, в результате чего они мешают друг другу, создавая новые заторы.

Результаты экспериментальной проверки показали, что применяемые в МАИТС методы имитационного моделирования, прогнозирования и управления ТП работоспособны и адекватны поставленным задачам. Это позволяет сделать вывод о том, что разработанная система соответствует цели работы - повышению эффективности оперативного управления дорожным движением.

Полученные для МАИТС полиномиальные оценки сложности позволяют сделать вывод, что разработанная система может решать задачи моделирования, анализа, прогнозирования и управления ТП в режиме реального времени.

Сравнение МАИТС с другими ТПС приведено в таблице 3

	МАИТС	«СТАРТ»	ATMC-ATIS	ТРТ- i-Transport
Поколение	3-ие поколение	1-ое поколение	2-ое поколение	3-ие поколение
Анализ ТП	проводится	отсутствует	проводится	проводится
Прогноз	проводится	отсутствует	отсутствует	проводится
Точность прогноза	72-97%	-	-	85-90%
Средства управления	Светофорное регулирование Координирование водителей	Светофорное регулирование	Светофорное регулирование Координирование водителей	Светофорное регулирование
Эффективность управления : β_v, β_3	$\beta_v = 5-24\%$ $\beta_3 = 6-23\%$	$\beta_v = 4-10\%$ $\beta_3 = 5-15\%$	$\beta_v = 8-17\%$ β_3 : данные отсутствуют	$\beta_v = 13-21\%$ β_3 : данные отсутствуют

Проведенный сравнительный анализ позволяет сделать вывод, что структура, модельно-алгоритмическое обеспечение и функциональные

возможности МАИТС соответствуют уровню наиболее совершенных среди существующих в настоящее время ИТС.

На базе проведенной разработки возможно дальнейшее совершенствование и повышение эффективности МАИТС в следующих направлениях:

- увеличение объема используемых в системе данных и знаний о предметной области на основе статистического анализа и проведения экспериментов над самой системой,

- разработка дополнительных механизмов анализа ограничений и стратегий строительства УДС,

- повышение степени детализации имитационного моделирования дорожного движения за счет введения дополнительных классов АА,

- повышение адаптивности системы за счет индуктивных процессов вывода.

Следует отметить, что проведение перечисленных работ, а также тестирование, отладка и внедрение МАИТС представляет собой длительный трудоемкий процесс, не являющийся предметом рассмотрения в данном исследовании.

Основные результаты проведенного анализа предметной области показана перспективность интеллектуальных транспортных систем (ИТС) при управлении транспортными потоками (ТП), выявлены недостатки существующих ИТС, сформулированы постановка задачи и основные принципы управления ТП мегаполиса.

2. Предложена функциональная схема управления ТП мегаполиса.

3. Получена имитационная модель ТП на основе гетерогенных агентов, позволяющая учитывать особенности поведения участников дорожного движения, структуру ТП и нештатные ситуации на дорогах.

4. Усовершенствован математический аппарат и создана методика управления ТП на основе нечеткого вывода и применения формализмов временной логики, которая:

- повышает эффективность оперативного управления благодаря прогнозированию динамики состояний ТП с учетом влияния нештатных ситуаций, последствий управляющих воздействий и других факторов;

- позволяет учитывать нестационарность и стохастичность ТП;

- снижает вычислительную сложность при решении перечисленных задач по сравнению с другими методами.

5. Разработаны структура и базы знаний многоагентной системы, реализующей созданную методику.

6. Программно реализована многоагентная интеллектуальная транспортная система (МАИТС), соответствующая сформулированным принципам управления ТП мегаполиса.

7. Проведены экспериментальная проверка и анализ свойств созданной МАИТС, результаты которых позволяют утверждать, что данная система соответствует цели работы и решает поставленные задачи:

моделирование, анализ, прогнозирование и управление ТП в режиме реального времени.

Публикации по теме диссертации

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов отражено в следующих научных и научно-технических работах автора:

- 1) Могорас А.А. Исследование и программная реализация метода абдукции для интервальной логики Аллена // Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2005.
- 2) Могорас А.А. Интеллектуальный мониторинг для мультиагентных систем управления с темпоральным представлением знаний. // Обзорение прикладной и промышленной математики; - М.: ОПиПМ, 2005, том. 12.
- 3) Могорас А.А. Логико-динамическая система управления транспортными потоками, на основе гетерогенных агентов. // Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2006.
- 4) Могорас А.А. Логико-динамическая система управления транспортными потоками, на основе интеллектуальных агентов. // XIV международная студенческая школа-семинар; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2006.
- 5) Могорас А.А. Интеллектуальная система ситуационного управления транспортными потоками, на основе гетерогенных агентов. // Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2007.
- 6) Могорас А.А. Система ситуационного управления транспортными потоками, на основе интеллектуальных агентов. // XV международная студенческая школа-семинар; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2007.
- 7) Могорас А.А. Имитационное моделирование динамики транспортных потоков на основе аппарата нечеткой логики. // Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2008.
- 8) Могорас А.А. Моделирование, структурный анализ и прогнозирование динамических характеристик транспортных потоков на основе аппарата нечеткой логики. // XVI международная студенческая школа-семинар; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2008.
- 9) Тюхов Б.П., Могорас А.А. Прогнозирование и оптимизация транспортных потоков на основе интеллектуальных агентов с применением нечеткой логики. // XVI Международная конференция «Проблемы

управления безопасностью сложных систем»; Тезисы докладов. - М.: ИПУ, 2008.

10) Могорас А.А. Моделирование и прогнозирование транспортных потоков с помощью нечеткой модальной логики. // Ежегодная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ; Тезисы докладов. - М.: МИЭМ, 2009.

Публикации в журнале, включенном ВАК в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов:

11) Могорас А.А. Моделирование и прогнозирование транспортных потоков с помощью нечеткой временной логики. // Естественные и технические науки; ISSN 1684-2626. - М.: «Компания Спутник+», 2009, №1, с. 283-289.

12) Тюхов Б.П., Могорас А.А. Прогнозирование и управление дорожным движением на основе интеллектуальных агентов. // Естественные и технические науки; ISSN 1684-2626. - М.: «Компания Спутник+», 2009, №2, с. 372-379.