**Донской государственный технический университет Кафедра «Организация перевозок и дорожного движения»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КУРСУ**

**«Теория транспортных потоков в приложении к интеллектуальным транспортным системам»**

для студентов заочного обучения направления 23.04.01 Технология транспортных процессов

образовательная программа «Интеллектуальные транспортные системы»

***Разработал д.т.н., профессор В.В. Зырянов***

Ростов-на-Дону

2022

**1. Анализ тенденций развития моделей дорожного движения в условиях функционирования интеллектуальных транспортных систем**

Создание современной транспортной инфраструктуры требует применения эффективных, оперативных и достоверных методов оценки проектных решений. В условиях, когда в крупных городах одновременно разрабатывают и внедряются проекты развития многих участков сети, систем управления движением необходимо уже на начальной стадии в совокупности оценить возможные изменения, которые произойдут в целом на сети, а не в отдельности на этих участках сети. Разработка и адаптация к реальным условиям моделей транспортного потока для повышения эффективности планирования развития транспортной инфраструктуры и оценки эффективности ее функционирования в реальном режиме времени является в настоящее время важнейшим условием выбора рациональных вариантов с учетом противоречивых проектировочных, строительных и эксплуатационных требований.

Возрастание транспортной нагрузки, усложнение задач управления дорожным движением, ужесточение требований к достоверности прогнозов об изменении дорожно-транспортной ситуации вызывают необходимость постоянного развития методов моделирования.

Традиционные в предшествующий период направления применения моделей для решения задач управления дорожным движением на локальном уровне не соответствуют основным современным требованиям по функциональным возможностям, оперативности, размеру и сложности отображаемой дорожной сети. Новые требования к моделированию дорожного движения определяют в числе основных целей и задач моделирования переход от локальных объектов к сетевым, интеграции стратегий моделирования для макро, мезо и микромоделей, представлением дорожной сети в интеграции с интеллектуальными транспортными системами.

С прикладной точки зрения это означает существенные изменения в подходе к роли и значению методов моделирования дорожного движения при управлении транспортными системами. Все эти модели, прежде всего, должны быть адаптированы к решению практических задач по анализу распределения транспортных потоков во времени и пространстве, контроля движения на автомобильных дорогах, обнаружения дорожно-транспортных происшествий, прогнозирования и ликвидации заторовых ситуаций, формированию стабильных режимов движения.

Анализ различных международных проектов по включению методов моделирования движения в оперативную деятельность по управлению транспортными потоками показывает, что важнейшими прикладными функциями, для которых должны быть адаптированы модели дорожного движения, являются:

* мониторинг транспортных потоков на дорожной сети с использованием различных источников информации;
* выявление заторов и оценка их последствий;
* динамическая маршрутизация с учетом фактической загрузки дорожной сети в данный момент времени;
* выявление и устранение последствий инцидентов на улично- дорожной сети;
* информирование посредством дорожных табло с переменной информацией;
* использование информации плавающих автомобилей;
* управление на въездах на автомагистрали и платные автомобильные дороги.

В табл. 1 приведен обобщающий перечень функциональных

приложений методов моделирования применительно к различным задачам интеллектуальных транспортных систем.

Таблица 1 - Перечень функциональных приложений методов моделирования применительно к различным задачам интеллектуальных транспортных систем

|  |  |
| --- | --- |
| Основные сферы применения ИТС | Основные функциональные приложения моделирования |
| 1 | 2 |
| **Управление дорожным движением** | Мониторинг характеристик транспортных потоков Мониторинг данных об условиях движения с помощью пробных автомобилей (probe car, floating car) Мониторинг данных об условиях движения с помощью мобильных источников связи  Мониторинг состояния дорог и метеоусловий на дорожной сети  Создание баз данных по характеристикам транспортных потоков и параметрам дорожной сети  Управление движением на сети автомобильных дорог Управление дорожным движением на въездах на автомагистрали  Управление на платных автомобильных дорогах с автоматической электронной платой за проезд Интеграция моделирования в центрах управления движением  Оценка качества функционирования дорожной сети Мониторинг загрязнения окружающей среды |

|  |  |
| --- | --- |
| 1 | 2 |
| **Обеспечение безопасности дорожного движения. Управление в чрезвычайных ситуациях.** | Обнаружение дорожно-транспортных происшествий, управление движением в опасных ситуациях  Выработка стратегии управления в чрезвычайных ситуациях  Маршрутная навигация и предоставление приоритета специальным транспортным средствам  Оперативное изменение схем организации дорожного движения при ДТП, сложных и чрезвычайных ситуациях Выявление нарушений скоростного режима и других нарушений Правил дорожного движения |
| **Информаци- онное обеспе- чение** | Интеграция баз данных систем управления дорожным движением в транспортных коридорах  Обеспечение дотранспортной информацией участников движения  Информирование операторов о маршрутной сети, планирование поездок  Маршрутное ориентирование, динамический контроль за прохождением маршрута в реальном режиме времени Интерактивное информационное обеспечение |
| **Задачи стратегическо го уровня** | Моделирование для определения размещения компонентов интеллектуальных транспортных систем Проектирование развития дорожной сети и транспортной инфраструктуры  Транспортное планирование |

Специфичность моделирования движения в условиях интеллектуальных транспортных систем обусловлена тем, что практически все задачи управления движением в первую очередь связаны с автоматическим определением местоположения автомобиля, а это возможно только при использовании микромоделей. С другой стороны, необходимо прогнозировать изменение условий движения, времени поездки и т.д., происходящие на дорогах большой протяженности и прилегающих участках сети. Поэтому основная проблема, которая должна быть решена при моделировании дорожного движения в условиях интеллектуальных транспортных систем, заключается в применении микромоделей движения автомобилей на сетевом уровне.

Анализ существующих подходов к построению моделей транспортных потоков показывает, что для повышения эффективности решения задач управления движением необходимо устранить следующие противоречия:

между детерминированным подходом к формированию модели транспортной сети и случайным характером формирования потока автомобилей, случайным характером изменения параметров движения потоков на сети, случайным характером изменения пропускной способности элементов сети и ее конфигурации;

между типичным критерием моделирования оптимальных маршрутов по длине маршрута в расчете на единичного пользователя и многокритериальным подходом при фактических массовых перемещениях транспортных потоков;

между макроскопическим подходом при решении типовых транспортных задач по рациональному распределению транспортных потоков и микроскопическим подходом, учитывающим такие важные свойства как динамичность, нестационарность, невоспроизводимость, существование часто противоречивых ограничений для различных групп пользователей.

Учитывая стохастическую природу дорожного движения, динамичность изменения его характеристик во времени, по прежнему большую сложность представляет процесс качественной оценки и прогнозирования изменений дорожно-транспортных ситуаций на улично-дорожной сети. Для реализации различных стратегий управления дорожным движением необходимо в реальном режиме времени собрать достоверную информацию о движении автомобилей на сети с учетом вероятностных свойств транспортного потока. От уровня решения этих задач в большой степени зависит правильность и своевременность выбора оптимальных управленческих решений, адекватных реальной ситуации.

Анализ тенденций использования моделирования показывает, что особое значение для моделирования имеет организация мониторинга и создание базы данных по характеристикам транспортных потоков. Чем более сложными становятся модели, тем более точная и полная информация необходима для применения этих моделей. Моделирование движения требует получения дополнительных данных, значительных усилий на поиск и устранение ошибок, а также включает такой сложный этап как калибровка созданной модели. Ключевым моментом является не само по себе моделирование, а возможность получения данных, необходимых для обоснования принятия конкретного решения. Кроме того, использование моделирования не является типовым процессом для всех ситуаций, а полученные результаты, в любом случае, не могут быть приняты к использованию без тщательной проверки. Эффективность применения моделирования за рубежом во многом объясняется именно наличием достаточной и достоверной входной информации для моделей.

В результате мониторинга должна быть получена системная информация о характеристиках транспортных потоков. Однако для того, чтобы использовать эту информацию мониторинга характеристик дорожного движения необходимо, прежде всего, получить надежные, достоверные, динамически обновляющиеся и рационально распределенные во времени и пространстве данные. Основными проблемами здесь являются:

* подход к мониторингу как к разовому мероприятию при решении какой-либо локальной задачи;
* ограниченность области изменения характеристик транспортных потоков;
* отсутствие координации между техническими требованиями при сборе данных и функциональными требованиями при использовании полученных данных в реальных системах управления;
* отсутствие логической связи при получении данных и использовании их в моделях оценки и прогнозирования условий движения на дорожной сети.

Особенностью современных подходов к моделированию является возможность оперативного получения множества параметров дорожного движения, что с одной стороны позволяет создавать более точные модели, но с другой стороны, требует предварительной проверки полученных данных. Когда данные о характеристиках транспортных потоков поступают в автоматическом режиме с транспортных детекторов и средств маршрутной навигации, которые находятся в разных точках улично-дорожной сети и с различной дискретностью, необходимы специальные методы и критерии для проверки соответствия этих данных. Однако при моделировании данные мониторинга обычно не проходят проверку на достоверность, и к чему это может привести, можно показать на следующих примерах.

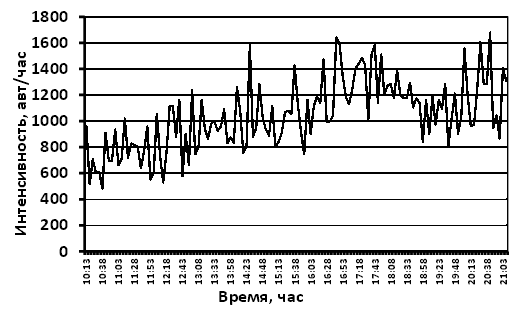


Рис. 1 - Первичные данные измерения интенсивности движения

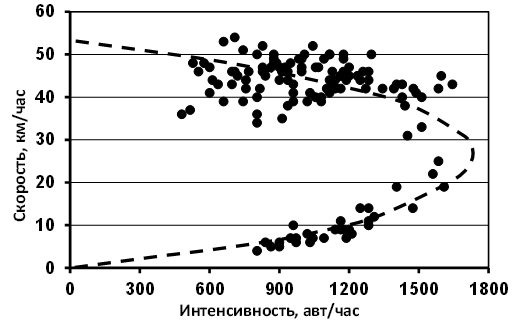


Рис. 2 - Зависимость интенсивность - скорость для данных, приведенных на рис. 1

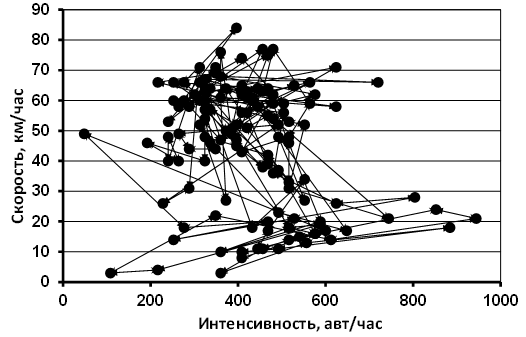
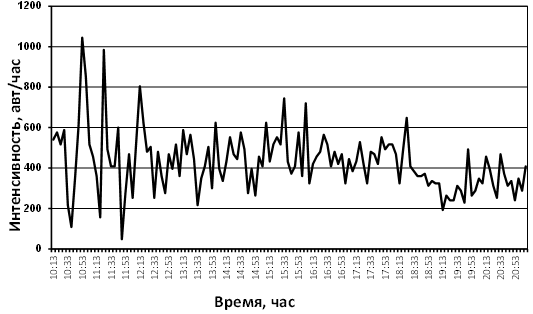


Рис. 3 - Первичные данные измерения интенсивности движения и отсутствие зависимости интенсивность - скорость для этой ситуации

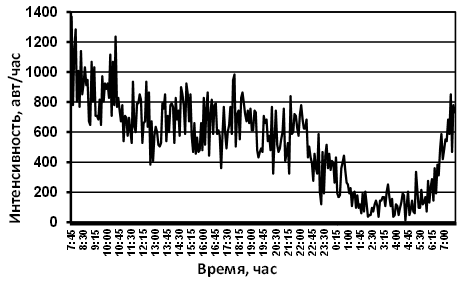
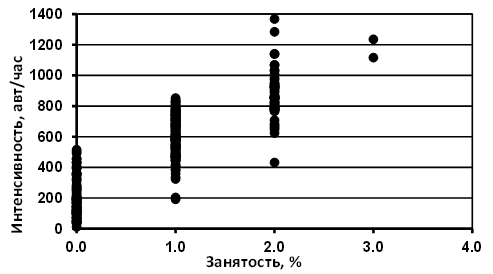
 

Рис. 4 - Первичные данные измерения интенсивности движения и отсутствие зависимости интенсивность - занятость для этой ситуации

Хотя первичные данные не отличаются по характеру изменения, дополнительный анализ позволяет выявить ошибки мониторинга. Первая ситуация (рис. 1) приводит к адекватной зависимости между интенсивностью и скоростью и этим результатам можно доверять. Во втором случае (рис. 3) зафиксированы несвязанные изменения интенсивности и скорости, что не соответствует природе дорожного движения и необходимы дополнительные измерения. В третьем случае (рис. 4) можно интерпретировать, что данные получены только при одном уровне занятости, хотя интенсивность движения изменяется в широких пределах. Можно предположить, что такой характер данных обусловлен неисправностью детектора. Такие данные не могут быть использованы для анализа и моделирования.

Таким образом, для использования всех возможностей, которые заложены в современных методах моделирования и программном обеспечении необходима детальная предварительная информация, калибровка разработанных моделей и интерпретация полученных результатов. Чем сложнее и функциональнее методы моделирования, тем более строгие требования предъявляются к этим этапам работы, что, к сожалению, часто игнорируется в отечественной практике.

Существующие подходы и модели анализа транспортных систем при решении задач развития транспортной инфраструктуры можно разбить на следующие категории (поскольку ранее рассмотрены методы моделирования в точки зрения воспроизведения характеристик транспортных потоков, то здесь приведена классификация по формированию транспортного спроса):

* аналитические детерминированные модели, входящие в нормативные и методические документы для решения относительно простых задач прогнозирования транспортной нагрузки, пропускной способности. В этом случае матрица корреспонденций является неизменной и при оценке транспортного спроса используется принцип статического равновесия в сети;
* модели транспортного спроса для транспортного планирования при

разработке проектов развития сети с матрицами корреспонденций для различных временных периодов и использованием принципа динамического равновесия в сети;

* модели оптимизации параметров светофорного регулирования;
* макромодели, основанные на зависимостях между интенсивностью,

плотностью и скоростью для оценки условий движения на определенных участках дороги;

* мезомодели, как промежуточный тип между моделями макро и

микроуровней, базирующиеся на макромоделях и моделях транспортного спроса для сетей больших размеров. Модели мезоуровня более упрощенно описывают динамические процессы в транспортном потоке. Используются динамические матрицы корреспонденций;

* микромодели для воспроизведения режимов движения каждого

автомобиля в потоке с учетом геометрических характеристик дороги, параметров автомобиля, косвенным учетом типа вождения. Используются динамические матрицы корреспонденций.

На выбор метода моделирования влияют следующие основные

факторы:

* характеристики объекта проектирования, размеры улично-дорожной сети;
* наличие и доступность баз данных по характеристикам транспортных

потоков и дорожной сети;

* применяющиеся и перспективные методы и технические средства

управления дорожным движением, включая применение интеллектуальных транспортных систем;

* функциональные задачи проектирования;
* ресурсное обеспечение.

Cравнительные характеристики различных методов моделирования приведены в табл 2.

Таблица 2 Сравнительные данные об основных свойствах моделей, которые могут быть использованы при решении задач в условиях ИТС

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Особенности моделирования | Модели транспортного спроса | Модели мезоуровня | Модели микроуровня |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Размеры зоны моделирования и планирования | Дорожная сеть регионов и мегаполисов | Дорожная сеть регионов и мегаполисов | Модели отдельных крупных участков дорожной сети |
| Метод прогнозирования транспортного спроса | Статические матрицы коррес- понденций между началь- ными и конеч- ными пунктами | Динамические матрицы коррес- понденций между началь- ными и конеч- ными пунктами | Динамические матрицы коррес- понденций между начальными и конечными пунктами |
| Управление дорожным движением | Не учитывается | Неполный учет параметров функциониро- вания систем управления дорожным движением | Детальный учет параметров функционирования систем управления дорожным движением |
| Распределение потоков в сети | Равновесное значение затрат на элементе сети в соответствии с зависимостями между транс- портной задер- жкой и интенсивностью. | Динамическое равновесие, основанное на транспортной нагрузке при моделировании | Поведенческие модели, учитыва- ющие процессы следования за лидером, смену полосы движения, выбор маршрута движения для каждого автомобиля |

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Преимущества | Легкость калибровки моделей. Возможность анализа распределения поездок по видам транспорта. | Возможность динамического анализа на региональном уровне, в т.ч. при планировании развития сети и транспортной инфраструктуры. Средний уровень сложности при калибровке моделей. | Возможность детального динамического анализа различных стратегий развития дорожной сети и транспортной инфраструктуры, включая развитие интеллектуаль-ных транспортных систем. |

Однако для получения объективных результатов, для того, чтобы моделирование носило не демонстрационный характер и не сводилось к визуализации, а являлось реальным рабочим инструментом, необходима детальная проработка фактических данных об объекте моделирования. Структура и методика создания этого подхода включают следующие основные этапы:

создание базы данных по дорожной сети;

создание базы данных по характеристикам транспортных потоков; создание и оценка матриц корреспонденций на улично-дорожной сети; создание базы данных по стратегиям управления;

калибровка модели для оценки достоверности результатов моделирования;

моделирование сценариев развития улично-дорожной сети и транспортной инфраструктуры.

Реализация полной функциональной интеграции макро, мезо и микроуровней позволяет осуществить системное моделирование, начиная с макроуровня для анализа и транспортного планирования дорожной сети большой протяженности с автоматическим переходом к динамическим моделям на дорожных сетях меньших размеров. Последующий динамический анализ на микроуровне позволяет выявить возможные конфликтные зоны во времени и пространстве. Это является особенно ценным, так как одновременно с развитием дорожной сети рассматриваются возможности автоматизированных систем управления дорожным движением.

Таблица 3. Оценка возможности существующих моделей в ИТС

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Стратегии управления на автомагистралях | Микромодели | Мезомодели | Макромодели транспортного спроса |
| Информационное обеспечение ИТС и участников движения | **+++** | **++** | **-** |
| Повышение эффектив- ности функционирования дорог | **+++** | **++** | **-** |
| Перераспределение потоков с учетом прилегающих участков сети | **++** | **+++** | **+** |
| Управление транс- портным спросом с учетом пропускной способности | **+++** | **+** | **++** |
| Управление на платных дорогах | **+++** | **++** | **+** |
| Возможность использования в ИТС в режиме реального времени | **++** | **++** | **-** |

В зависимости от сложности поставленных задач должны использоваться в интегрированном режиме следующие основные типы моделей:

Макромодели транспортного спроса – являются эффективными средством при анализе и прогнозировании транспортной нагрузки на региональном уровне, первичной оценке пропускной способности и сопоставлении прогнозируемого транспортного спроса с пропускной способностью

Мезомодели – целесообразно использовать при анализе транспортной информации, планировании и управлении на платных дорогах, управлении в условиях заторов, управлении на полосах с разрешением двигаться автомобилям с несколькими пассажирами

Микромодели – область их применения стремительно расширяется, эффективны при управлении дорожным движением, в т.ч. в режиме реального времени, управлении на въездах на автомагистрали и платные дороги, выявлении инцидентов, при информационном обеспечении участников движения.

Многие из существующих программных реализаций моделей являются автономными с соответствующей целевой направленностью и не имеют механизмов для взаимодействия с другими программными продуктами. Интеграция различных типов моделей и использование преимуществ каждой из них обеспечивает наиболее полную поддержку задач планирования, проектирования и управления на автомобильных дорогах.

Основные требования к интерфейсу между различными моделями и их программной реализацией:

* логическая взаимосвязь между аналитическими подходами;
* согласованность между параметрами оценки эффективности управления

на автомобильных дорогах.

Алгоритм интеграции моделирования на макро, мезо и микроуровнях состоит из следующих этапов.

1. Начальная стадия моделирования осуществляется на макроуровне для проведения анализа и стратегического транспортного планирования анализ крупных объектов. Эта стадия обычно реализуется по классической четырехступенчатой методике для решения следующих задач:
2. Импорта в программную оболочку модели цифровой карты транспортной инфраструктуры в зоне моделирования для редактирования модели автомобильной дороги.
3. Импортировать из ГИС дополнительную информацию о прилегающей территории.
4. Оценить модели генерации и поглощения транспортных потоков.
5. Оценить транспортный спрос и транспортный спрос для пиковых периодов, в случае приближения транспортного спроса к пропускной способности произвести детальные расчеты и скорректировать матрицу корреспонденций.
   1. Разработать и использовать модели распределения поездок,

осуществить прогнозирование изменения транспортного спроса в соответствии с планируемыми мероприятиями.

1. Осуществить распределение транспортных потоков на основе

моделей равновесия среди всех участников движения.

1. Выявить критические участки дорог, на которых потенциально могут

возникнуть сложные ситуации. Изучить эти ситуации более детально с использованием микромоделей.

1. В случае полной интеграции макро, мезо и микромоделей следующим

методологическим шагом после выявления критических участков будет детализация этих критических участков.

1. Полная интеграция макро, мезо и микромоделей позволяет

автоматически генерировать микромодель выбранного критического участка.

1. Для выполнения микромоделирования критического участка

необходимо построить матрицу корреспонденций для этого участка на основе общей матрицы корреспонденций макроуровня.

1. Если имеются данные мониторинга для зоны моделирования,

необходимо осуществить проверку полученных матриц корреспонденций для критических участков с данными мониторинга. Данные мониторинга являются также основой для построения матриц корреспонденций для малых периодов времени.

1. Скорректированные и сглаженные по временным периодам матрицы

корреспонденций являются входной информацией для микромоделирования транспортного потока на выявленных критических участках.

1. Результаты моделирования используются для оценки предложенных рекомендаций, генерации новых сценариев.
2. Если результаты моделирования являются адекватными и позволяют

улучшить ситуации, то для данной задачи процесс моделирования можно полагать законченным. В противном случае необходимо продолжить поиск путей решения проблемы.

**2. Анализ наиболее эффективных программно-моделирующих комплексов**

В настоящее время в основном применяют моделирование движения на микроуровне для решения различных задач, используя при этом как собственные модели и программы моделирования, так и интегрированные коммерческие программные продукты, которые существенно сокращают сроки разработки проектов, гарантируют корректность заложенных в них алгоритмов и моделей, имеют графический интерфейс, обеспечивают проработку различных сценариев. Основой всех этих коммерческих программных продуктов являются различные типы моделей: макромодели, модели транспортного спроса, мезомодели, модели следования за лидером в совокупности с моделями смены полосы движения. Особенно чувствительными в этой совокупности моделей являются микромодели. Поэтому применение той или иной модели следования за лидером в этих программных продуктах влияет на результаты моделирования. С расширением применения коммерческих программных продуктов появились различные исследования по сопоставлению результатов моделирования для одних и тех же сценариев. В этой связи целесообразно также привести некоторую информацию о типах моделей следования за лидером в различных коммерческих программах.

Программный пакет **AIMSUN** (**A**dvanced **I**nteractive **M**icroscopic **S**imulator for **U**rban and **N**on-Urban **N**etworks) был разработан исследовательской группой Департамента статистики и исследования операций Каталонского политехнического университета (Испания) под руководством профессора Х. Барсело. В настоящее время AIMSUN развивается и распространяется компанией Transport Simulation Systems (TSS).

В AIMSUN моделирование движения осуществляется на основе модели следования за лидером П. Джиппса. При этом уточняются некоторые параметры модели и вводятся конкретные дополнения, чтобы косвенно учитывать тип водителя, скоростные параметры транспортных средств, ограничения скорости на конкретных участках дороги. В модели следования за лидером предусмотрено использовать конкретные физические характеристики автомобилей – длина, ширина, ускорение, замедление. Для приближения к реальным условиям эти параметры автомобилей определяются случайным образом с использованием для каждого типа автомобиля среднего, минимального и максимального значения каждого параметра и их среднеквадратического отклонения.

В оригинальной модели следования за лидером П. Джиппса время реакции водителя является одинаковым для всех. Однако в AIMSUN для учета характеристик водителя реакция является переменной величиной и устанавливается пользователем на основе дискретной функции вероятности с учетом шага моделирования. Кроме того предусмотрена возможность изменения времени реакции водителя на различных участках сети и в случае полной остановки на пересечениях и в других ситуациях. Это является особенно важным, потому что в соответствии со свойствами модели Джиппса при остановке на регулируемых пересечениях время реакции влияет на формирование и рассасывание очереди автомобилей.

В последней версии AIMSUN в модели следования за лидером учитывается минимальный интервал между лидером и ведомым автомобилем как дополнительная информация для определения замедления. При этом вводится параметр "фактор чувствительности – α. Когда фактор чувствительности менее 1 это можно интерпретировать как агрессивного водителя, который недооценивает замедление лидера и, следовательно, соблюдает меньшую дистанцию до лидера. В том случае, когда фактор чувствительности менее 1 можно полагать, что модель имеет дело с осторожным водителем, который завышает замедление лидера и соблюдает большую дистанцию следования.

AIMSUN реализует функции моделирования на макро, мезо и микроуровнях, позволяет дополнять стандартный пакет моделирования собственными программами для решения специфических задач. AIMSUN также используется в режиме реального времени в интеллектуальных транспортных системах.

AIMSUN эффективно используется при решении задач управления движением и планирования развития транспортной инфраструктуры во многих странах мира. Наиболее известные проекты:

Интеллектуальная транспортная система сети автомагистралей для моделирования и управления движением в реальном режиме времени - земля Гессен (Германия) в районе Франкфурта-на-Майне;

Динамическое моделирование движения на кольцевой автомагистрали в Пекине в период разработки транспортного плана Олимпиады и системы управления движением;

Оценка уровня безопасности автомобильных тоннелей, оценка пропускной способности тоннелей, моделирование адаптивных стратегий управления движением в тоннелях. Практически выполненные проекты –Сен- Готтардский тоннель (Швейцария), туннель Виелха (Испания);

Моделирование системы управления движением на автомагистралях Барселоны и прилегающих к ней территориях;

Оценка условий движения и управление движением на автомагистралях в Мадриде;

Оценка пропускной способности на входах в платные дороги, числа полос на этих дорогах, условий функционирования при различных технологиях оплаты, прогнозирование времени поездки и безопасности движения (Япония, Южная Африка).

В программе моделирования Verkehr in Stadten—simulation  **VISSIM** моделирование движения автомобилей осуществляется на основе модели следования за лидером психофизиологического типа Р. Вийдеманна. Следовательно, при моделировании движения переход от одной фазы к другой осуществляется на основе заранее установленных пороговых значений. Поскольку пороговые значения могут различаться предусмотрено два варианта моделей следования за лидером – для городской улично-дорожной сети и для автомагистралей. Кроме того предусмотрена возможность отклонения от пороговых значений на основе применения случайных чисел. При моделировании в VISSIM описывается каждый элемент водитель - автомобиль. Основные геометрические характеристики автомобилей (длина, ширина) определяются случайным образом с использованием для каждого типа автомобиля среднего, минимального и максимального значения каждого параметра и их среднеквадратического отклонения. Также при моделировании пользователь может назначать параметры модели следования за лидером, влияющие на дистанцию следования.

VISSIM также может работать на различных уровнях моделирования – макро, мезо и микроуровнях. Стандартная четырехшаговая модель состоит из следующих этапов:

* **Модель генерации (создания) транспортного движения.**  На этапе

генерации транспортного движения рассчитываются объемы движения из источника и движения в цель для всех транспортных районов, детализированные по слоям спроса, но без детализации по видам транспорта. Результатами расчета являются итоговые строки и столбцы матриц корреспонденций.

* **Модель распределения транспортного движения.** На этапе распределения транспортного движения рассчитываются объемы транспортного потока между всеми транспортными районами, детализированные по слоям спроса, но без детализации по типам транспортных средств. Результатами расчета являются элементы матриц корреспонденций.
* **Модель разделения транспортного движения.**  На этапе разделения транспортного движения рассчитываются матрицы корреспонденций, каждая из которых соответствует поездкам с использованием определенного вида транспорта.

**Модель перераспределения по выбору маршрута.**  Расчет перераспределения транспортного движения, дифференцированный по видам транспорта, позволяет получить модельные значения интенсивности транспортных потоков региона. Этап перераспределения является завершающим в цикле расчёта спроса. Модельные значения нагрузки, полученные в результате расчета, приобретают смысл прогнозных оценок интенсивности транспортного движения.

VISSIM относится к числу широко распространённых программ моделирования и применяется для решения практических задач в 75 странах мира. VISSIM представляет собой современную информационно- аналитическую систему поддержки принятия решений, которая позволяет осуществлять стратегическое и оперативное транспортное планирование, прогнозирование интенсивности движения, обоснование инвестиций в развитие транспортной инфраструктуры, оптимизацию транспортных систем городов и регионов, а также систематизацию, хранение и визуализацию транспортных данных.

Модель следования за лидером, используемая в программном пакете **PARAMICS**  (**Para**llel  **Mic**roscopic  **S**imulation) основана на модели психофизиологического типа X. Фритше, но с определенными изменениями. Автомобиль описывается четырьмя поведенческими параметрами – агрессивность и информированность, задаваемыми по нормальному закону, терпение и дружественность. В модели следования за лидером также учитываются такие параметры как средний целевой временной интервал между лидером и ведомым автомобилем, среднее время реакции и сохранение информации о скорости в шагах дискретности моделирования.

PARAMICS имеет различные модели транспортного планирования. PARAMICS позволяет моделировать функции интеллектуальных транспортных систем, оптимизировать распределение транспортных потоков. Хотя в основе этого программного пакета лежат принципы микромоделирования, но возможно моделировать дорожное движение на дорогах большой протяженности или на сетевом уровне. PARAMICS позволяет создать адекватную модель поведения транспорта на улично-дорожной сети с целенаправленным моделированием поездок. PARAMICS дает возможность подобрать соответствующую модель поведения, и увидеть, как может поступить водитель в той или иной ситуации. Это также предоставляет дополнительные возможности при калибровке и оценке адекватности модели. PARAMICS также используется во многих странах мира.

В интегрированной системе моделирования  **CORSIM**  (Corridor Traffic Simulation Model), объединяющей две программы **NETSIM** для моделирования городской улично-дорожной сети и **FRESIM** для моделирования движения на автомагистралях в последней программе в качестве основы используется модель следования за лидером, разработанная в университете г. Питтсбурга (Pitt model). Эта модель относится к классу моделей следования за лидером, основанных на определении безопасной дистанции между автомобилями и гипотезе исключения столкновений между лидером и ведомым автомобилем.

Благодаря интеграции с одной из самых эффективных программ оптимизации светофорного регулирования TRANSYT пакет **CORSIM** является мощным средством моделирования движения в условиях ИТС. Наиболее широко применяется в США.

Программное обеспечение  **AVENUE** разработано в Японии. В основе моделирования лежит гибридный метод, который сочетает микромоделирование с воспроизведением движения каждого автомобиля и моделирование движения транспортного потока с использованием гидродинамических моделей на основе интегральных параметров транспортного потока. Таким образом, осуществляется интеграция моделирования на микро и макроуровнях. Динамическая модель выбора маршрута работает по двум алгоритмам – оптимальное распределение по детерминированным моделям и оптимальное распределение по стохастическим моделям.

Все модели интегрированы в одном программном пакете. Поэтому пользователи могут осуществлять моделирование данных с графическим интерфейсом и оперативно проверять любые параметры.

Калибровка и оценка адекватности результатов моделирования производятся в AVENUE на основе методических рекомендаций, существующих в Японии. Для идентичности калибровки в Японии имеется тестовый набор ситуаций. Этот тестовый набор включает ситуации для скоростных дорог, городских магистралей. Калибровка в модели AVENUE осуществляется по этому стандартному набору данных. Эта процедура осуществляется как для макро, так и для микромоделей. Для моделирования на макроуровне основой является соответствие результатов основной диаграмме транспортного потока. Для калибровки и оценке адекватности микромоделирования используются критерии, отражающие режимы движения автомобилей и поведение водителей. Одно из существенных различий между калибровкой макро и микромоделей заключается в использовании параметра "пропускная способность". В макроскопической модели пропускная способность автомобильной дороги выступает качестве входной переменной, в то время как в микроскопической модели, пропускная способность дороги является результатом моделирования на основе движения каждого автомобиля.

При генерации транспортных средств рассматриваются следующие параметры калибровки:

* соответствие распределения скорости транспортных средств на входе в

модель фактическому распределению скорости на исследуемом объекте и соотношению скорость-плотность;

* соответствие распределения интервалов между автомобилями

заданному транспортному спросу;

* накопление очереди автомобилей на входе в моделируемый участок дороги;
* соответствие основной диаграмме транспортного потока.

Это программное обеспечение нашло применение в основном в Японии.

**MITSIMLab** основан на методах микромоделирования и позволяет решать задачи это автоматизированной системы управления дорожным движением, системы информирования пользователей дорожной сети, моделировать различные стратегии ИТС на оперативном уровне. MITSIMLab обеспечивает исчерпывающее представление транспортных подсистем, включая транспортные средства, системы мониторинга характеристик транспортных потоков. MITSIMLab представляет установленные функции систем управления транспортом на детальном уровне, включая важные аспекты центра управления транспортом, системы наблюдения, алгоритмы управления, для того чтобы создать адекватную модель с широким выбором вариантов. Моделирование позволяет иметь возможность изменения полос движения и их выбор водителем. Водители делятся на тех, кто информирован об условиях поездки, и тех, кто не информирован об условиях поездки. При этом предполагается, что информированные водители имеют достаточные данные, чтобы узнать о возможностях своей поездки по тому или иному маршруту. Цель MITSIM спрогнозировать поведение любых водителей, находящихся на улично-дорожной сети.

MITSIM позволяет при данном времени поездки предложить альтернативный маршрут до своего пункта назначения с условием выполнения всех требований по организации дорожного движения. Также рассматриваются ситуации, когда есть платные участки дорог, дорожные инциденты и рассматривается реакция водителей на них.

MITSIMLab используется в США, Великобритании, Швеции, Италии, Швейцарии, Японии, Корее, Малайзии и других странах.

**DynaMIT** является современной системой моделирования в реальном режиме времени, которая специально предназначена для эффективной поддержки Транспортных Информационных Систем, Автоматизированных систем управления дорожным движением и Центров управления движением.

DynaMIT осуществляет моделирование на мезоуровне. DynaMIT использует совокупность детально проработанных моделей транспортных потоков, а мезоуровень позволяет реализовать функции моделирования условий движения в режиме реального времени. Программа использует методы информирования водителей – знаки с изменяющейся информацией, информационные табло. Таким образом, система управления транспортом может не только координировать и оптимизировать маршрутную сеть, но и информировать участников дорожного движения о ситуации на дороге в режиме реального времени.

Методологии для онлайн и оффлайн оценки потоков и оффлайн и онлайн калибровки различных параметров транспортных потоков позволяют получать адекватные результаты для систем управления.

Ключом к функциональности DynaMIT является детальное представление сети, в сочетании с моделями поведения пользователей сети. Благодаря эффективной интеграции архивных информационных баз данных, получаемых в режиме реального времени, Dynamit эффективно обеспечивает:

-оценку состояния сети;

-прогнозы изменения состояния сети при различных мероприятиях по управлению движением;

* стратегии распространения информации для участников движения. Неоднократно делались попытки сравнительной оценки точности

воспроизведения реальных режимов движения в связке лидер-ведомый

различными программами моделирования. Наиболее известной из них является оценка результатов моделирования на основе данных о реальных режимах движения, полученных исследовательской группой Бош. Экспериментальные данные были получены в условиях движения на городских магистралях в г. Штутгарте (Германия). При движении записывались скорость, ускорение лидирующего и ведомого автомобилей и дистанция между автомобилями. На следующих графиках приведены параметры движения в этом эксперименте.



Рис. 6 - Изменение скорости движения лидера

Анализ изменения скорости движения лидера показывает, что движение осуществляется в сложных условиях на городской улице при небольшой скорости движения, но с высокой неравномерностью движения и тремя остановками. Можно сказать, что выбранный профиль движения полностью соответствует задаче тестирования поведения моделей, поскольку есть два главных ситуационных условия для проверки адекватности моделей – резкие изменения скорости и торможение до полной остановки.



Рис. 7. Изменение дистанции между автомобилями

Достаточно высокий уровень относительной скорости между лидером и ведомым автомобилем и изменение дистанции в широком диапазоне показывает, что существует возможность проверить все возможные ситуации и пороговые значения для психофизиологических моделей следования за лидером.

Результаты этого эксперимента были использованы для сравнительной оценки некоторых интегрированных пакетов моделирования, которые основаны на моделях следования за лидером. Это следующие программы моделирования:

* модель  **MITSIM** разработанная в Массачусетском технологическом

институте. Модель базируется на типе модели следования за лидером Р. Хермана;

модель **PELOPS** разработанная в техническом университете Аахена.

Основана на модели следования за лидером Р. Вейдемана;

* модель  **VISSIM**, которая также использует модель следования за

лидером Р. Вейдемана;

* модель  **NSM** Нагеля-Шекенберга основанная на гипотезе сотовых

автоматов;

* модель  **OVM** оптимальной скорости, разработанная М. Бандо,

основанная на допущениях, что водители выбирают режим движения в соответствии с разницей между скоростью в данный момент времени и оптимальной скоростью при движении на соответствующей дистанции;

* ***Т3*** модель, основанная на выборе ускорения или замедления ведомого

автомобиля по регрессионным моделям;

* модель **AIMSUN,** котораяоснована на модели следования за лидером П. Джиппса.

В качестве критерия для сравнения соответствия расчетных параметров моделирования экспериментальным данным использовалась ошибка при выборе дистанции, а для того, чтобы устранить влияние больших отклонений эта ошибка определялась по следующей формуле

(1)

где *df* - мгновенная дистанция между лидером и ведомым автомобилем

зафиксированная в эксперименте;

*ds* - мгновенная дистанция между лидером и ведомым автомобилем полученная расчетным путем по каждой из моделей.

В таблице содержатся сравнительные результаты оценки отклонения результатов моделирования от экспериментальных данных,

Таблица 4

Сравнительные данные оценки отклонений расчетной дистанции от реальной для различных моделей

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Значение ошибки *ЕМ* | Наименование модели | | | | | | |
| MITSIM | PELOPS | VISSIM | NSM | OVM | *Т3* | AIMSUN |
| 3,75 | 14,01 | 10,67 | 24,51 | 9,37 | 2,4 | 3,47 |

Более точные сравнительные исследования, которые обеспечили полную идентичность входных данных, были позднее проведены для трех программ моделирования AIMSUN, VISSIM и PARAMICS. Для каждой программы также использовались данные, полученные исследовательской группой Бош в реальных условиях. Для оценки результатов использовались два статистических критерия - среднеквадратическая ошибка *RMSE* и взвешенная логарифмическая оценка *ЕМ* (2.62) для реальной и моделируемой дистанции между лидером и ведомым автомобилем

(2)

Таблица 2

Точность моделирования некоторых программ

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование критерия | Наименование программы моделирования | | | |
| AIMSUN | VISSIM | | PARAMICS |
| *ЕМ* | 2,55 | 4,78 | 4,50 | 4,68 |
| *RMSE* | 4,99 | 5,72 | 5,05 | 10,43 |

Следует отметить, что эти результаты соответствуют тому моменту времени, когда они были получены, но более поздних сравнительных данных более не приводилось.

Таким образом, в настоящее время в мире сформировался круг современных программно-моделирующих комплексов в сфере управления дорожным движением в условиях интеллектуальных транспортных систем. Эти программно-моделирующие комплексы воспроизводят основные функциональные приложения интеллектуальных транспортных систем, прошли проверку на многих реальных проектах и поэтому могут гарантированно применяться для решения практических задач по управлению дорожным движением.

Признаком современных программно-моделирующих комплексов является возможность интеграции моделирования на основе различных подходов – макро, мезо и микроуровнях. Для выполнения функций интеллектуальных транспортных систем в дорожном движении следует в первую очередь обращать внимание на те программно-моделирующие комплексы, которые позволяют функционировать в он-лайновом режиме и прошли проверку в реальных системах управления.

Для повышения доверия к моделям, входящим в эти комплексы, необходимо анализировать микромодели движения автомобилей, включенные в эти комплексы. Некоторые программно-моделирующие комплексы представляют свои микромодели как «черный ящик». Очевидно, что предпочтение должны иметь те программно-моделирующие комплексы, которые дают полное описание моделей. Практически на каждом объекте моделирования и управления возникают оригинальные задачи, которые не входят в стандартные программно-моделирующие комплексы. Поэтому должен быть сделан выбор в пользу программно-моделирующих комплексов, которые имеют удобный программный интерфейс для создания собственных подпрограмм в соответствии с требуемыми функциями и включения этих подпрограмм в стандартный пакет для совместной работы.

Желательно, чтобы программно-моделирующий комплекс имел интерфейс с другими программно-моделирующими комплексами, поскольку практически невозможно иметь в одном пакете абсолютно все функции для моделирования интеллектуальных транспортных систем.

**Литература**

1. Зырянов В.В. Моделирование дорожного движения. – Ростов-

на-Дону: Ростовский государственный строительный университет, 2015. - 163 с.

1. Barcelo, J. (2010). Fundamental of traffic simulation. Springer.

440 p.

1. Gipps, P. G. (1981). A behavioural car following model for

computer simulation. Transportation Research B, 15, 105-111.

1. Toledo T., Koutsopoulos H. N. (2004) Statistical validation of

traffic simulation models. Transportation Research Board Annual Meeting Proceedings. TRB 2004, Washington DC.