

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЕ

© 2004 Т. И. Михеева

Самарский государственный аэрокосмический университет

Описывается система моделирования управления движением. Рассматриваются алгоритмы локального и координированного управления («Зеленая волна»). В качестве критерия оптимальности выбрана средняя задержка транспортного средства.

Обострение проблем, связанных с развитием автомобильного транспорта, происходит на фоне роста интенсивности движения при недостаточном развитии улично-дорожной сети (УДС), особенно в городах с исторически сложившейся застройкой. Пути решения этих проблем - в развитии всей транспортно-дорожной инфраструктуры и, в частности, в развитии УДС за счет строительства мощных скоростных общегородских магистралей. Однако это требует значительных инвестиций, хотя и приведет к глобальному улучшению. Наиболее доступным путем решения этих проблем является совершенствование организации дорожного движения (ОДД) в «узком смысле», рассматриваемой как комплекс инженерных и организационных мероприятий на существующей УДС. Хотя эффективность таких мероприятий и ограничена, но их внедрение значительно менее капиталоемко.

В настоящее время имеются возможности для внедрения эффективных методов управления дорожным движением. Во многих крупнейших городах мира функционируют автоматизированные системы управления движением, технические средства которых непрерывно совершенствуются. Однако развитие комплекса технических средств организации дорожного движения (ТСОДД) опережает развитие технологий управления, что обуславливает недостаточно эффективное применение дорогостоящей техники управления дорожным движением. Так, например, перегрузка отдельных элементов УДС делает бессмысленным координацию работы светофорных объектов, составляющую основу функционирования автоматизированной си-

стемы управления дорожным движением. В этих условиях имеет особое значение развитие методического обеспечения использования традиционной номенклатуры технических средств, направленного на оптимизацию загрузки элементов УДС, что создает необходимую основу для наиболее эффективного применения автоматизации управления. Применение соответствующих методов ОДД следует рассматривать в контексте формирования комплексных схем организации движения и выделить как важнейшую задачу оценку эффективности управляющих воздействий ОДД.

Исходя из этого, следует отметить особую актуальность разработки методов решения сетевых задач ОДД - повышение эффективности и безопасности дорожного движения путем рационального распределения транспортных потоков на УДС города.

Действиями, направленными на решение таких задач, являются оптимизация работы светофорных объектов автономных перекрестков для обеспечения их максимальной пропускной способности во всех конфликтующих друг с другом направлениях, организация движения транспортных средств по оптимальным маршрутам, мониторинг текущей дорожной ситуации и принятие решений для предотвращения дорожно-транспортных происшествий, заторов и т. д. Совокупность этих действий называется управлением дорожным движением.

Большие усилия уже были предприняты в различных областях управления дорожным движением. Управление отдельными перекрестками с адаптацией к изменениям объемов движения на подходах к ним было

реализовано в 30-х годах XX столетия и нашло особенно широкое применение в Европе. Однако существенный эффект не может быть получен путем раздельного управления изолированными перекрестками в районе, в котором плотность расположения светофоров настолько велика, что автомобиль проезжает через два соседних светофора приблизительно за 10 с [1]. Отсюда вытекает требование к коллективному, системному управлению сигналами светофоров. Значительный эффект был получен уже за счет управления сигналами светофоров на последующих друг за другом перекрестках одной магистральной улицы (координированного управления) и получения эффекта так называемой «зеленой волны» [1, 2, 3]. Сложность ее расчета заключается во множестве управляемых параметров, таких как цикл работы светофорного объекта на каждом перекрестке, скорость движения транспортных средств между перекрестками, смещение фаз работы светофорных объектов относительно друг друга и т.д.

Эффективность программ координации определяют следующие основные факторы:

- снижение уровня задержек транспортных средств у перекрестков, обусловленное оптимизацией управления светофорной сигнализацией;

- увеличение средней скорости движения транспортных средств на перегонах между перекрестками за счет уменьшения длин очередей у светофоров на красный сигнал и обеспечения минимально возможного числа перерывов в движении;

- сокращение числа неоправданных остановок в процессе движения, что приводит к уменьшению износа материальной части транспортных средств и дорожных покрытий.

Как следствие перечисленных выше факторов - сокращение времени проезда по магистрали, находящейся под контролем автоматизированной системы управления движением.

В целях упрощения расчета «зеленой волны» в рамках комплексного проекта «Интеллектуальная транспортная система» (ИТС), разрабатываемого на кафедре информационных систем и технологий СГАУ по заказу городского отдела ГИБДД УВД г. Са-

мары, создана подсистема моделирования движения транспортного потока на УДС.

Термин «Интеллектуальная транспортная система» в настоящее время характеризует комплекс интегрированных средств управления движением и перевозками, применяемых при решении всех видов транспортных задач на основе высоких технологий, методов моделирования транспортных процессов, программного обеспечения, организации информационных потоков в реальном режиме времени.

Рассмотрим подробно одну из транспортных задач – задачу управления движением и его организации на сети дорог. Для ее решения необходимо, прежде всего, выделить типовой элементарный участок УДС, включающий в себя перегон магистрали регулируемого движения и смежные с ним регулируемые пересечения (рис. 1). При этом базовой для городских условий является задача уточнения оценки параметров движения на таком элементарном участке в зависимости от состава транспортного потока, интенсивности движения, числа полос и параметров светофорного регулирования на смежном пересечении с учетом сетевых управляющих воздействий.

Представим УДС как систему и поставим задачу отыскать минимально необходимые элементы, из которых она может быть построена. Агрегатное построение модели сети позволяет рассматривать с единых позиций сети разных размеров и различных вариантов организации движения. При таком подходе достигается универсальность описания транспортного потока (ТП) в сети, так как УДС может быть разбита на стандартно описываемые элементы – участки дороги. Такими элементами в ИТС выбраны линейные участки дороги - перегоны, перекрестки дорог, пешеходные переходы и железнодорожные переезды [4, 5]. Для описания УДС с несколькими полосами движения с учетом направления движения по ним ТП дополнительно введены объекты: ребро и узел (рис. 2).

Триада <участок>, <узел>, <ребро> является базисом системы. Все остальные объекты будут так или иначе привязаны к этому базису.

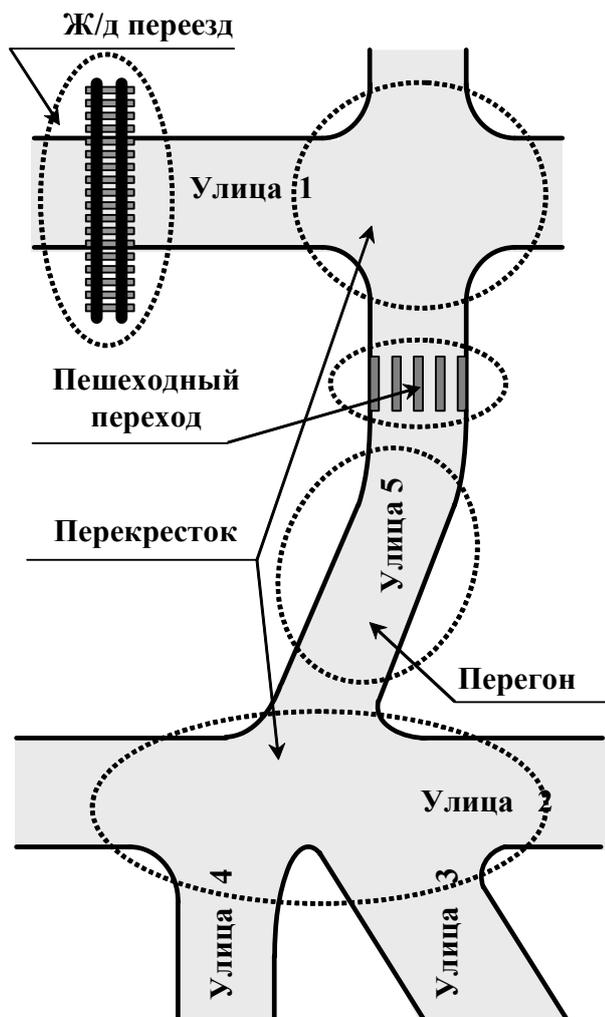


Рис. 1. Модель улично-дорожной сети

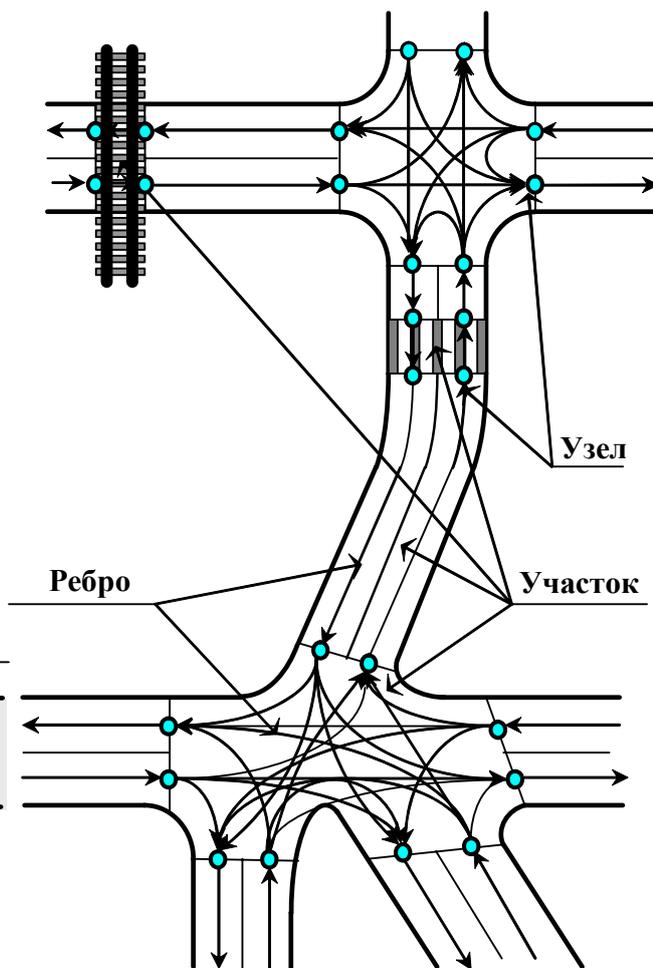


Рис. 2. Модель транспортной сети

<Участок> – физический участок УДС, описываемый единым набором физических параметров.

<Узел> – место разделения потоков транспортных средств. Узел является вершиной графа, описывающего потоки движения транспортных средств, всегда лежит на стыке двух участков и показывает возможность движения с одного участка на другой в соответствующем направлении. Двум участкам может быть поставлено в соответствие один или два узла, в зависимости от того, есть ли движение только в одном или двух направлениях.

<Ребро> - это ребро ориентированного графа, задающее направление движения ТП на участке и содержащее соответствующие характеристики (длина ребра, интенсивность движения в данном направлении, плотность потока и т.п.). Таким образом, двум узлам

может быть поставлено в соответствие одно или два ребра, в зависимости от того, есть движение только в одном или двух направлениях. На одном участке может проходить несколько ребер (потоков), но ребро может находиться только внутри единственного участка.

Пара объектов <узел>, <ребро> и таблица инцидентности задают ориентированный граф. В зависимости от решаемой задачи вес дуги выбирается или высчитывается по формуле из заданного набора параметров. Традиционно в графовых моделях транспортной сети вершины соответствуют перекресткам, а дуги - перегонам УДС. В рассматриваемой модели используется специальный граф, вершины которого соответствуют стоп-линиям на подходах к перекресткам, а дуги - проездам транспорта между стоп-линиями, что позволяет адекватно отобразить все осо-

бенности системы организации движения, учесть ограничения, связанные с запретами отдельных маневров транспортных средств, наличием одностороннего движения и т. п.

Объектом управления в ИТС является транспортный поток, представляющий собой совокупность большого числа дискретных элементов - автомобилей. Расширяя понятие улично-дорожной сети, опишем ТП как объект, расположенный на УДС.

На основе исследований дорожного движения и практики его организации [1, 2, 3, 6, 7] выработаны многочисленные измерители и критерии. К наиболее часто применяемым для характеристики движения показателям относятся:

- интенсивность движения I (авт/ч; авт/сут.);
- скорость движения V (км/ч; м/с);
- плотность транспортного потока K (авт/м);
- продолжительность задержки движения D (с).

Интенсивность движения I - это количество транспортных средств, проходящее через сечение дороги за единицу времени t . Важнейшее значение в проблеме организации движения имеет временная неравномерность этой характеристики: интенсивность движения различается в течение года, месяца, суток и даже часа. Помимо интенсивности ТП характеризуется *плотностью потока K* и *средней скоростью* потока V . Эти параметры ТП связаны соотношением

$$I = KV. \quad (1)$$

Графическое отображение (1) представляет собой основную диаграмму ТП (рис. 3), которая построена в виде зависимостей $V=f(I)$ и $I=f(K)$ для непрерывного ТП, движущегося по дороге без пересечений.

Принято выделять три основных режима движения: свободный поток, групповое или неустойчивое движение и насыщенный поток.

Свободный поток характеризуется малыми интенсивностями движения, отсутствием взаимных помех движению между отдельными автомобилями. С повышением интенсивности движения до максимального значе-

ния I_c , соответствующего пропускной способности дороги, скорость V уменьшается до величины, определяемой точкой C на основной диаграмме. В зоне $B-C$ (рис. 3, а) появляются существенные взаимные помехи движению автомобилей, в результате чего уменьшается возможность свободного обгона и образуются группы автомобилей (колонны), движущиеся с приблизительно одинаковой скоростью. Режим движения в этой зоне является *неустойчивым*, поскольку небольшое увеличение групп в потоке может привести не только к уменьшению скорости V , но и к переходу в область $C-D$, т. е. к снижению интенсивности движения. Поток в области $D-E$ принято называть *насыщенным* или *коллективным*. Характерной чертой такого потока является сильный разброс величины ускорений (замедлений) относительно среднего значения.

Экспериментальные исследования показали, что в зоне свободного потока зависимость $V=f(I)$ является почти линейной для случая непрерываемого потока. Анализ зависимости $I=f(K)$ показывает (рис. 3, б), что как для непрерываемого ТП, так и для городских условий движения существуют два характерных значения плотности потока K_c и K_j . *Критическая плотность* потока K_c - это значение, до которого с увеличением K возрастает I . При изменении плотности потока от K_c до K_j (*плотности потока в условиях затора*) интенсивность уменьшается от максимального значения пропускной способности I_c до нуля. При $K=K_j$ скорость потока также равна нулю. Тангенс угла α наклона радиус-вектора, проведенного из начала координат к точке, лежащей на кривой $I=f(K)$, соответствует физическому значению скорости V_s в данной точке (рис. 3, б).

Целью управления ТП на перекрестке является обеспечение безопасного и эффективного движения транспортных средств. Эти качественные оценки должны относиться к количественным критериям, которые необходимо измерить и оптимизировать.

Рассмотрим некоторые существующие связи между количественными критериями оптимизации и качественными целевыми концепциями.

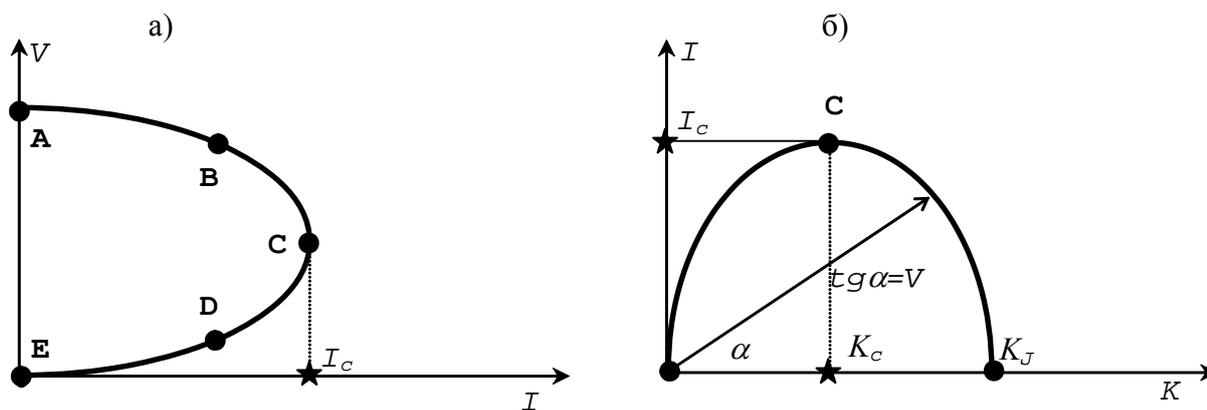


Рис. 3. Основная диаграмма транспортного потока:
а) зависимость $V=f(I)$; б) зависимость $I=f(K)$

- **«Количество остановок»**. Минимизируется количество остановок для повышения комфорта вождения автомобиля, пропускной способности перекрестка (особенно при интенсивном движении грузовых автомобилей), уменьшения количества дорожно-транспортных происшествий, сокращения выброса отработанных газов и снижения шума.

- **«Время задержки»**. Минимизируется время задержки для экономии времени участников движения, сокращения транспортно-экономических потерь, уменьшения выброса выхлопных газов.

- **«Длина очереди»**. Минимизируется длина очереди для ослабления нагрузки на отдельных водителей, сокращения выброса выхлопных газов и уменьшения шума.

- **«Средняя скорость»**. Максимизируется средняя скорость в пределах, обеспечивающих безопасность и оптимальность режимов движения.

- **«Расход горючего»**. Минимизируется расход горючего для экономии природных ресурсов, сокращения транспортно-экономических потерь, увеличения дальности пробега.

На основании перечисленных критериев в качестве основополагающего критерия эффективности исследуемых алгоритмов в ИТС принята величина задержки, приходящейся на одно транспортное средство. Достоинством этого критерия является исключительная простота реализации при исследовании любым способом (эмпирическим, аналитическим, моделированием), наглядность,

прямая связь со стоимостным выражением потерь и в связи с этим возможность непосредственной оценки эффективности процесса управления. В процессе исследования в системе моделирования в качестве «вторичных» использованы и другие критерии оптимизации.

Система моделирования «зеленой волны», являясь составной частью интеллектуальной транспортной системы [8], может работать в автономном режиме. В системе предусмотрена возможность исследования влияния на моделируемую ситуацию как одного из параметров транспортного потока и УДС, так и их совокупности. Она позволяет моделировать различные дорожные ситуации, визуализировать в динамике процесс прохождения ТП через транспортные узлы УДС, собирать статистику процесса моделирования [9].

Ввод исходных данных в системе моделирования может осуществляться как в ручном режиме, так и в режиме обмена данными с основной базой данных геоинформационной системы (в состав ИТС входит геоинформационная база данных, в которой хранится географическая составляющая информации об УДС города; объектах, расположенных на УДС; транспортных потоках и т. д.).

Система состоит из следующих функциональных блоков:

- построения визуальной модели УДС любой конфигурации;
- связи с геоинформационной базой данных;

- связи с собственной информационной базой данных;
- расчета оптимальных параметров регулирования транспортными потоками на автономном перекрестке;
- моделирования «зеленой волны» для магистральной улицы;
- динамической визуализации процесса моделирования «зеленой волны».

Блок построения визуальной модели УДС предназначен для визуального представления создаваемой модели УДС и включает в себя функции создания/сохранения нового моделируемого участка, загрузки/сохранения всей модели, редактирования/сохранения свойств текущего участка модели, установки параметров «по умолчанию» для различных типов участков УДС.

Блок связи с геоинформационной базой позволяет получить геометрические, географические и семантические данные о состоянии УДС, светофорных объектах, режимах их работы, дорожных знаках и т. д. В процессе моделирования формируются новые данные, которые сохраняются во временной базе данных и при необходимости могут быть восстановлены.

В блоке расчета параметров светофорного объекта на локальном перекрестке (моделирование локального управления ТП) реализованы функции расчета текущих и оптимальных параметров функционирования светофоров и сохранения результатов в базе данных «Паспорт светофорного объекта».

Блок моделирования «зеленой волны» выполнен в виде отдельной подсистемы, где предусмотрены просмотр результатов (графики и таблицы), а также текстовое сопровождение всего моделирующего процесса. Расчет параметров выполняется в зависимости от выбранного пользователем критерия оптимизации. Производится расчет как отдельных параметров (например, фазовых сдвигов светофорных циклов относительно предыдущего перекрестка), так и совокупности нескольких параметров (например, кроме фазовых сдвигов можно принять в качестве управляемой переменной скорость ТП на участке). Это позволяет в наглядной форме исследовать поведение системы в зависи-

мости от изменения соответствующих характеристик и выбрать наиболее приемлемое решение для оптимизации движения по моделируемому участку магистральной улицы.

Блок динамической визуализации процесса движения ТП по УДС предусмотрен для интерактивного наблюдения за процессом оптимизации построения «зеленой волны» [9].

Конечная задача локального управления - переключение светофорных сигналов в зоне одного перекрестка - разделена на несколько частных задач, решаемых в следующей последовательности:

- фазообразование - формирование фаз управления, т. е. совокупностей неконфликтующих направлений, по которым могут двигаться транспортные средства на перекрестке;
- компоновка фаз - формирование последовательности включения фаз управления;
- коррекция длительностей - формирование длительностей фаз управления;
- формирование переходных интервалов, в течение которых происходит смена фаз управления.

Эффективность локального управления ТП оценивается степенью приближения истинного состояния ТП \bar{Y} к цели управления, т. е. требуемому значению \bar{Y}^* . Предельное значение эффективности определяется равенством этих значений.

В качестве основополагающего критерия эффективности алгоритмов локального управления принята величина задержки транспортного средства у перекрестка. Для расчета принятого за основу критерия эффективности локального управления ТП принят критерий Вебстера. В качестве параметров, используемых для оценки задержки D , выступают: T - длительность цикла (сек); G_j - зеленая, R_j - красная фаза светофорного цикла (сек); N_j - число транспортных средств, ожидающих в очереди; I - интенсивность транспортных средств (авт/сек); g_j - часть эффективного времени горения зеленого сигнала, соответствующего времени свободно-го проезда (сек).

При реализации и сравнительной оценке алгоритмов управления ТП на перекрест-

ке в реальном масштабе времени в системе моделирования используется подход, включающий в себя: разбиение диапазона изменения интенсивностей на короткие циклы с приблизительно одинаковыми значениями; определение задержки для циклов с учетом режима работы перекрестка; суммирование расчетных значений для получения общего конечного результата.

В режиме разъезда очереди часть цикла, в которой образуется задержка, равна $t_{pj} = T_j - g_j$; число транспортных средств, ожидающих в очереди: $N_{pj} = I_j(T_j - g_j)$; число транспортных средств, задержанных в очереди в j -ом цикле: $N_{oj} = N_{j-1} + I_j T_j$.

Если рассматриваемый период T включает ситуации, соответствующие режимам разъезда очереди и остаточных очередей, то общая задержка определяется выражением

$$\sum_{j=1}^m D_j = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^{n_p} R_j \sum_{j=1}^{n_p} N_{pj} + \sum_{j=1}^{n_o} I_j R_j^2 + \sum_{j=1}^{n_o} (I_j - C) G_j^2 \right) + \sum_{j=1}^{n_o} N_{j-1} R_j + \sum_{j=1}^{n_o} N_j G_j,$$

где m – число циклов, содержащихся в периоде T ; n_p и n_o – число циклов режима *разъезда* очереди и *остаточных* очередей.

Целью расчета параметров светофорного регулирования при координированном управлении (КУ) является определение длительности фаз и величин сдвигов фаз, обеспечивающих минимум обобщенного критерия, учитывающего величину задержек и число остановок транспортных средств на перекрестках магистрали. Эффективность КУ можно повысить, если задачу расчета программ координации решать с учетом взаимного влияния соседних перекрестков, степени распада групп в зависимости от длины перегона, степени формирования групп в зависимости от величины сдвига фаз.

При моделировании процессов координированного управления транспортными потоками в системе определены следующие этапы исследований:

- выбор магистрали, удовлетворяющей поставленным требованиям;
- измерение параметров ТП на магистрали;

- проведение исследования зависимости задержек транспортных средств от величины сдвигов фаз $d=f(t)$;

- анализ данных и вывод зависимости $d=f(t)$;

- анализ данных и вывод зависимости величины сдвига фаз от времени проезда транспортных средств перегона $t_c=f_j(t)$.

В целях получения полной картины о возможностях используемого метода управления необходимо, чтобы исследуемый объект удовлетворял ряду следующих требований:

- интенсивность движения - от 300 до 700 авт/час на полосу движения (в приведенных единицах);

- количество полос - не менее двух (чтобы существовала возможность маневров);

- диапазон длин перегонов - до 1000 м;

- характер движения автомобилей на перегонах - групповой;

- отсутствие на перегонах помех движению (стоянки транспортных средств, остановки общественного транспорта и т. д.).

Сущность компьютерных (аналитических) расчетов заключается в переборе вариантов, в результате чего определяются управляющие параметры, соответствующие минимуму критерия эффективности. Порядок расчета включает в себя:

- расчет длительности цикла на каждом перекрестке магистрали и выбор общего;

- расчет длительностей фаз на каждом перекрестке;

- расчет величин сдвигов фаз на каждом перекрестке.

Наиболее простым случаем является КУ движением ТП на магистрали с односторонним движением. В этом случае можно воспользоваться графоаналитическим методом расчета [10] с учетом зависимости выбора сдвигов фаз. Сущность метода заключается в построении графика путь-время. Графоаналитический метод получил широкое распространение благодаря его сравнительной простоте и наглядности. Однако для расчета большого числа программ координации этот метод малоэффективен в силу его высокой трудоемкости.

При расчете программ координации для магистралей с двусторонним движением ТП

возникают ситуации, которые сложно и трудно правильно решать с помощью графо-аналитического метода. При моделировании такого вида движения ТП в системе используется следующий метод. Определяются сдвиги фаз на каждом перекрестке, включенном в моделируемую магистраль, минимизирующие величину обобщенного критерия (временной задержки) ТП на магистрали

$$D = \min_{t_{c_i}} \sum_{i=1}^n [f(D_i) + \varphi(D'_i)]_1,$$

где $f(D_i)$ – задержка ТП на i -м перекрестке для прямого направления; $\varphi(D'_i)$ – задержка ТП на i -м перекрестке для встречного направления,

$$f(D_i) = \int_0^{a_i} I_i(t - t_{c_i}) \left[t_{kp_i} + \frac{1}{S_i} \int_0^t I_i(\tau - t_{c_i}) d\tau \right] dt,$$

$$\varphi(D'_i) = \int_0^{a'_i} I'_i(t - T - t_{c_{i+1}}) \left[t_{kp_i} + \frac{1}{S'_i} \int_0^t I'_i(\tau - T - t_{c_{i+1}}) d\tau - t \right] dt.$$

Здесь a_i и a'_i – момент окончания разгрузки очереди на i -м перекрестке для прямого и встречного направлений; I_i и I'_i – интенсивность ТП, прибывающего к i -му перекрестку в прямом и встречном направлениях; t_{kp_i} – длительность красного сигнала светофора на i -м перекрестке; S_i и S'_i – интенсивность разгрузки очереди на i -м перекрестке в прямом и встречном направлениях,

$$a_i - t_{kp_i} = \frac{1}{S_i} \int_0^{a_i} I_i(t - t_{c_i}) dt,$$

$$a'_i - t_{kp_i} = \frac{1}{S'_i} \int_0^{a'_i} I'_i(t - T + t_{c_{i+1}}) dt.$$

Решение полученной системы уравнений позволяет найти сдвиги фаз, минимизирующие величину задержки на магистрали.

В системе реализованы как метод аналитического расчета оптимальных фазовых

сдвигов путем решения системы уравнений, метод полного перебора всех возможных значений с оценкой критерия эффективности для каждого из них и выбором оптимального, так и метод имитационного моделирования.

Точность моделирования зависит от интервалов дискретизации пространства и времени, в которых определяется значение характеристик. В системе моделирования интервалом дискретизации пространства выбран участок перегона с односторонним движением фиксированной длины. С учетом реализации в модели основных соотношений между характеристиками ТП определены следующие требования к его поведению на участке:

а) ТП представляется в интервале $(t \div t + \Delta t)$ на i -м участке числом, соответствующим с точностью до единицы числу транспортных средств (долей ТП), находящихся на нем;

б) на один интервал времени Δt доля ТП на i -м участке не может продвигаться дальше соседнего $i+1$ -го участка;

в) доля ТП $n_{t,i}$ за интервал Δt увеличивается на число $\Delta n_{t,i-1}$, перешедшее с $i-1$ -го на i -й участок: $n_{t+\Delta t,i} = n_{t,i} + \Delta n_{t,i-1}$;

г) плотность ТП на i -м участке в течение одного интервала времени постоянна:

$$L_{y,i} : K_{t,i} = n_{t,i} / L_{y,i};$$

д) скорость продвижения ТП на $i-1$ -ом участке (при заполнении i -го участка) определяется в зависимости от плотности $\bar{K}_{t,i}$ (усредненной по некоторой длине L перегона, включающего участок) и имитируется соотношением

$$V_{t,i-1} = V_{\max} - \xi_{II} \bar{K}_{t,i}, \quad (2)$$

где V_{\max} – максимальная плановая скорость ТП, ξ_{II} – коэффициент пропорциональности с размерностью «расстояние в квадрате, деленное на число транспортных средств и время».

Использование технологии объектно-ориентированного проектирования позволило решить задачу разработки таксономичес-

ких моделей инструментальных классов поддержки среды моделирования интеллектуальной транспортной системы для проведения исследований управления транспортными потоками на УДС г. Самары [11, 12, 13, 14]. СОМ и ОЛЕ-технологии, используемые в разработанной системе, позволяют полученные в процессе моделирования данные передать в MS Word и MS Excel в виде готовых документов.

В настоящее время разработан пилот-проект системы моделирования координированного управления транспортными потоками, который проходит апробацию в отделении дорожного надзора городского отдела ГИБДД УВД г. Самары.

Список литературы

1. Клинковштейн Г. И. Организация дорожного движения. – М.: Транспорт, 1975. – 192 с.
2. Кременец Ю. А. Технические средства организации дорожного движения. – М.: Транспорт, 1999. – 255 с.
3. Брайловский И. О., Грановский Б. И. Моделирование транспортных систем. - М.: Транспорт, 1978. - 125 с.
4. Михеева Т. И., Большаков А. С. САПР улично-дорожной сети города // В кн. Развитие инновационного потенциала отечественных предприятий и формирование направлений его стратегического развития – Пенза: МНИЦ, 2003. – С. 100 – 102.
5. Михеева Т. И., Михеев С. В., Чугунов И. А. Автоматизированная информационная система «Улично-дорожная сеть города» // В кн. Безопасность транспортных систем – Самара, 2002. – С. 265-268.
6. Дрю Д. Теория транспортных потоков и управление ими. - М.: Транспорт, 1972. - 424 с.
7. Иносе Х., Хамада Т. Управление дорожным движением: Пер. с англ. М.: Транспорт, 1983. – 248 с.
8. Михеева Т. И., Михеев С. В. Исследование методов локального управления транспортными потоками движением // В кн. Актуальные проблемы радиоэлектроники. – Самара: СГАУ, 2002. – С. 91-95.
9. Михеева Т. И., Скрыпка А. С., Штырбу М. И. Визуализация координированного управления транспортными потоками / Математика. Компьютер. Образование // Тезисы докладов XI международной конф. – М. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. - С. 50.
10. Михеев С. В. Алгоритм жесткого координирования дорожного движения // В кн. Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении. - Самара: СГАУ, 2001. – С. 80-88.
11. Автоматизация проектирования вычислительных систем. Языки, моделирование и базы данных // Под ред. М. Брейера: Пер. с англ. - М.: Мир, 1979. - 463 с.
12. Михеева Т. И., Михеев С. В. Модели наследования в системе управления дорожным движением // Информационные технологии, 2001. № 7. - С. 50-54.
13. Budd T. An Introduction to Object-Oriented Programming. –1997. – 467 с.
14. Grutzner R. Environmental modeling and simulation – application and future requirements. Proceedings of the Environmental Symposium on Environmental Software Systems, IFIP, 1996, p.113-122.

ROAD TRAFFIC SIMULATION IN THE INTELLECTUAL TRANSPORT SYSTEM

© 2004 T. I. Mikheeva

Samara State Aerospace University

A simulation system for road traffic control is introduced. Algorithms of local and coordinated control are described. An average delay of a vehicle at a crossroad was chosen as the basic optimality criterion.