

ВЕРОЯТНОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ЧЕРЕЗ РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПЕРЕКРЕСТОК С РАЗВЕТВЛЯЮЩИМИСЯ ТРАССАМИ

Валуев А.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, г. Москва, ул. Бардина, д. 4
valuev.online@gmail.com

Аннотация: Предложена вероятностная модель трафика на регулируемом перекрестке с разветвлением трасс, построенная в форме гибридной динамической системы и учитывающая разброс статических и динамических параметров и вождения отдельных автомобилей, стохастический характер выбора направления проезда перекрестка. Модель может служить инструментом прогнозирования и управления транспортной обстановкой.

Ключевые слова: регулируемый перекресток, управление, схема пофазного разъезда, микроскопические модели транспортных потоков, гибридные динамические системы, вычислительные эксперименты

Введение

Вероятностные факторы в транспортных потоках многообразны и являются предметом множества теоретических и эмпирических исследований. Они могут быть выявлены в движении конкретной транспортной единицы (ТЕ) — транспортного средства (ТС) под управлением конкретного водителя (в частности, случайные погрешности в оценивании скорости и положения собственного и соседних автомобилей); случайный характер имеет и момент начала перестроения на соседнюю полосу и самый факт такого перестроения, если он не диктуется выбором определенной полосы для проезда предстоящего перекрестка в требуемом направлении.

Вероятностные факторы проявляются и в характеристиках локальных совокупностей ТЕ на участке полосы и дороги в целом, в т.ч. и ТЕ, проезжающих через конкретный перекресток за один светофорный цикл или за более длительный период. Помимо объективных статических и динамических характеристик автомобилей — участников движения в конкретном месте, — определяемых моделями ТС и их техническим состоянием, выявляются стили вождения, различающиеся зависимостями желательного расстояния между соседними ТС (субъективно воспринимаемого как безопасное) в зависимости от их скоростей [1]. Состав транспортного потока в отношении наличия в нем некоторого количества ТЕ различных типов, разумеется, является случайным. Применительно к проезду перекрестка по разрешенным трассам (без разветвлений) несомненно, фиксируемым фактом — следствием вышесказанного — являются заметные колебания количества ТС, проезжающих перекресток по одной и той же трассе за одну фазу заданной продолжительности, относящуюся к разным светофорным циклам.

Целесообразность учета вероятностных факторов при моделировании автотранспортных потоков, однако, зависит от моделируемой ситуации; например, для трафика на магистралях с редкими перекрестками и запретом парковки на обочинах влияние случайных факторов менее значительно и может не учитываться. Широкое использование детерминированных моделей транспортных потоков (ТП), а также некоторых типов стохастических моделей с искусственно вводимой стохастикой (к последним относятся некоторые типы моделей в классе клеточных автоматов; в них перемещение на случайное количество клеток в за один такт модельного времени вводится для получения более реалистичной оценки скорости потока в целом) показывает необязательность вероятностной формы модели во многих ситуациях.

Результаты исследования, представленные в [2], показали, однако, целесообразность вероятностного моделирования трафика на перекрестке для случая без ветвления трасс. Наличие такого ветвления лишь добавляет случайных факторов; к ним теперь относится и выбор трассы в точках ветвления каждым очередным достигающим ее автомобилем. Учет этого фактора и его последствия изучаются в настоящей работе.

Следует отметить, что построение вероятностной модели прохождения ТП через перекресток может производиться двумя принципиально разными путями: — либо с помощью фиксации процесса проезда перекрестка с помощью технических средств (радаров, видеокамер и проч.) с последующей вычислительной обработкой данных мониторинга, либо путем построения вероятностной математической модели, проведения массовых вычислительных экспериментов на ней и расчета интегральных характеристик рассчитанных транспортных потоков. На наш взгляд, возможности второго подхода шире, поскольку в первом случае получаемые данные касаются тех транспортных

ситуаций, которые наблюдались в действительности, а для прочих ситуаций прогнозные показатели могут вычислены лишь путем интерполяции, мало надежной при значительных отклонениях потенциальной ситуации от наблюдавшихся. Но такие отклонения для прогнозируемых, проектируемых или внезапно и непредсказуемо наставших ситуаций вполне вероятны; они могут быть связаны как с запланированными изменениями организации дорожного движения (например, при изменении ограничений на разрешенную грузоподъемность или разделения трасс проезда перекрестка, вводе в действие или отключении второстепенных светофоров на въездных или выездных дорогах) или параметров светофорного регулирования или в силу иных обстоятельств, изменяющих интенсивность ТП через перекресток или распределение его по направлениям (например, проведении дорожных работ, крупных авариях, вводе в действие новых дорог или дорожных сооружений, организации выделенных полос и т.п.). Вероятностный прогноз результатов изменения характеристик прохождения ТП через перекрестки особенно важен именно при проектировании или планировании действий, меняющих ГДС или организацию движения на ней и в этом случае едва ли может полагаться на использование в качестве аналогов ранее наблюдавшихся ситуаций. Помимо всего прочего, для крупных городов с множеством пересекающихся многополосных дорог структуры существующих перекрестков весьма разнообразны и практически не повторяются [3], что крайне затрудняет использование аналогов. Всё отмеченное выше и побуждает сосредоточиться на развитии второго подхода к вероятностному моделированию ТП на перекрестке.

1 Существующие подходы к вероятностному моделированию прохождения ТП через перекрестки

Исследование и моделирование ТП на перекрестках в целом не получило широкого распространения, о чем свидетельствует обзорная монография [4], в которой данная тема совершенно не раскрыта. Макроскопические подходы, как основанные на гидродинамической аналогии, так и сформулированные в терминах равновесия транспортных потоков, совершенно не пригодны для этой цели, поскольку не представляют транспортный процесс как случайный.

Микроскопические модели, основанные на некотором представлении движения всех ТС, составляющих ТП, или, по крайней мере, некоторых событий в движении каждого ТС с их временной привязкой, принципиально являются более подходящим инструментом применительно к дорожному движению через регулируемые перекрестки. Три основных подхода к вероятностному представлению ТП на фрагментах ГДС — модели в форме случайных потоков, клеточных автоматов или квазиклеточных сетей и динамических систем; возможны также некоторые их комбинации. Однако у известных моделей имеются ряд затруднений при их применении.

Модели, представляющие транспортный процесс в форме случайных потоков [5–7], являются феноменологическими и не могут непосредственно учитывать влияние изменений в организации дорожного движения и значения параметров светофорного регулирования. Транспортный процесс представлен моментами немногих характерных событий, чего в определенных целях (прогноза) могло бы быть достаточно, но не для перекрестков сложной структуры, содержащими разветвляющиеся трассы. В основательной монографии [5] рассматриваются многочисленные типовые по своей структуре перекрестки, которые, однако, далеко не покрывают реального их разнообразия [3]. При этом не рассматриваются ряд факторов, определяющих вероятностную природу ТП — как состав потока, так и геометрию перекрестка, от которой зависит расположение ОТ на трассах и вытекающие из нее характеристики динамики ТС.

Модели клеточных автоматов [8–10] всегда приближенно отображают геометрию участка ГДС, но не могут адекватно учесть разнотипность ТЕ. Они существуют в разных формах начиная от традиционной модели типа Нагеля-Шрекенберга с достаточно грубой дискретизацией дорожного пространства и крайне упрощенным представлением динамики, сводящейся к перемещениям транспортных средств за один такт модельного на одну-три клетки (или отсутствию перемещения). Обычная клеточная дискретизация дорожного полотна затрудняет, а по существу делает невозможным сколь-нибудь точное представление изменения скорости движения отдельных ТС на перекрестке, при котором изменяется не только ее величина, но и направление. Элемент стохастичности, вводимый в модель для достижения более реалистичных значений средних скоростей, — а именно, рандомизация перемещений за такт модельного времени — применяется одинаковым образом, обезличено, ко всем ТС, не передавая тем самым действительную стохастичность транспортного потока, состоящую в том, что по своему составу он представляет собой статистический ансамбль разнотипных ТС. Наоборот, в интерпретации С.Л. Кленова и др. [10]

единственной сохранившейся чертой КА является дискретизация времени и пространства, которая может быть достаточно мелкой; по существу, такая модель ближе к моделям в форме динамических систем; однако она не применялась для представления потока через перекресток.

Среди моделей ТП в форме динамических мы видим множество работ по однополосным и многополосным дорогам, но не по проезду перекрестка, исключая модели, разработанные в нашей собственной лаборатории ИМАШ РАН [11]. В отношении формы модели как гибридной динамической системы с переключениями на многообразиях (событий но-переключаемого процесса — СПП) с нами принципиально на одних позициях стоит В.М. Ерёмин [12], однако точной формулировки каких-либо микроскопических моделей его работы не содержат. В настоящей работе развивается общий подход, выдвинутый в [13] и с тех пор конкретизированный для фрагментов ГДС различной структуры [14–16]. Конкретно, развиваемая здесь модель представляет изучаемый процесс как стохастически возмущенный СПП.

2 Структура перекрестка и организация движения на регулируемом перекрестке

Перекрестки и их окрестности являются наиболее сложными в структурном и геометрическом аспекте частями городской дорожной сети (ГДС). Эта сложность определяется тем, что: 1) при приближении к перекрестку количество полос зачастую увеличивается ради обеспечения возможности проезда перекрестка по разным направлениям; 2) полосы каждой подъездной дороги на перекрестке расходятся, причем если некоторые целиком переходят в соответствующие полосы на выездных дорогах, то другие разветвляются на самом перекрестке; 3) часть разрешенных трасс — осей дорожных полос — искривляются. Всё перечисленное создает затруднения как для водителей — в силу необходимости быстро реагировать на целый ряд изменений в условиях движения — так и для системы организации и управления дорожным движением, которая должна создать условия для максимально безопасного движения при необходимости пропуска необходимого количества транспортных средств по всем разрешенным направлениям. Пример сложного перекрестка на пересечении двух московских магистралей показан на рис. 1).

Детальное представление перекрестка в виде ориентированного графа предполагает выделение в качестве дуг графа участков разрешенных трасс между характерными точками, а в качестве вершин — этих точек. К последним относятся: 1) входы области перекрестка — точки пересечения осей входных полос с входными стоп-линиями (ТСЛ); 2) конфликтные точки — точки пересечения, слияния и разделения (ветвления) трасс в области перекрестка, которые с точки зрения динамики ТС являются *особыми точками* и потому обозначаются далее ОТП, ОТС и ОТР; 3) точки пересечения трасс с внутренними стоп-линиями (ТВнСЛ) при их наличии в случае многосекционного перекрестка [17]). Кроме того, к ним могут быть отнесены точки начала и окончания искривленных участков трассы, значение которых для движения проезжающих их ТС состоит в том, что первые требуют заблаговременного снижения скорости перед ними, а проезд вторых, наоборот, позволяет увеличить скорость.

Ввиду необходимости рассмотрения неподвижной или пришедшей в движение очереди автомобилей перед каждой ТСЛ трасса начинается не с ТСЛ, а с условного входа (границы расширенной области перекрестка), положение которого должно быть выбрано таким образом, чтобы автомобиль, движущийся в этом месте с максимальной разрешенной скоростью, заведомо мог остановиться, присоединившись к стоячей очереди. Также на каждой трассе задается условная точка выхода после последней ОТ и ТВнСЛ на трассе в случае их наличия. Входы и выходы также относятся к вершинам графа. Если трассы разветвляются между входом и ТСЛ, такие ОТР также служат вершинами графа структуры перекрестка.

Дополнительным обстоятельством, характеризующим структуру перекрестка, является следующий эмпирически установленный факт: на каждой трассе точка слияния, если она есть, находится ближе к концу трассы, чем точка ветвления.

Как уже отмечалось ранее, установленное на уровне организации движения разделение трасс прохождения перекрестка между фазами светофорного цикла — т.н. схемы пофазного разъезда — делают принципиально *неактивными* все особые точки, кроме точек ветвления. Тем не менее, в начале каждой фазы могут быть краткие промежутки времени, в течение которых через определенную ОТП или ОТС еще не прошли все транспортные средства, начавшие движение на предыдущей фазе, но при этом первые ТС с новой фазы уже приблизились к ним и, следовательно, вынуждены замедлить свое движение. Прогнозирование таких ситуаций как детерминированных заведомо не точно; именно рассмотрение проезда перекрестка как случайного процесса и позволяет охарактеризовать эти ситуации и учесть их влияние на прохождение ТП через перекресток.

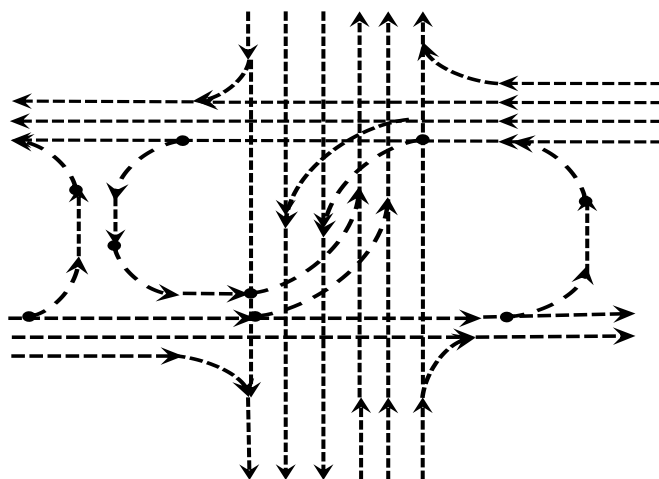


Рис. 1. Пример структуры перекрестка (площадь Иосипа Броз Тито — пересечение Профсоюзной улицы с Нахимовским проспектом)

В проекции на структуру перекрестка светофорное регулирование выражается переключением вершин графа — ТСЛ и ТВнСЛ — между состояниями пропуска и задержки. Следствием его являются также переключения ОТП и неактивных ОТС между направлениями их проезда.

3 Случайный процесс проезда перекрестка отдельными транспортными средствами

В настоящей статье рассматривается моделирование транспортных потоков через перекресток в их «микроскопическом» представлении, детализированном до уровня траекторий всех ТС, проезжающих перекресток в течение заданного периода. В связи с этим необходимо охарактеризовать не только процесс движения каждого ТС через перекресток, но и его появление на входе перекрестка, а следовательно — входящие потоки на каждой входной полосе в дискретном представлении. Собственно проезд перекрестка отдельной транспортной единицей в модели определяется ее начальным состоянием, постоянными характеристиками этой ТЕ и, разумеется, взаимодействием с соседними ТС и с системой светофорного регулирования.

Будучи направленной на компьютерное моделирование транспортного процесса, предлагаемая модель включает в себя два элемента: 1) определение характеристик каждой отдельной ТЕ — начального состояния и статических характеристик — как случайных величин и 2) представление движения совокупности ТЕ с так определенными характеристиками на основе детерминированной модели, иначе говоря — одной реализации случайного процесса проезда перекрестка совокупностью транспортных единиц в течение заданного периода. Количество таких ТЕ определяется реализациями случайных потоков их появления на каждом входе. Случайные отклонения в реализации индивидуального закона управления отдельных ТЕ не рассматриваются в модели по ряду причин: отсутствию достоверных данных о таких отклонениях, вычислительной трудоемкости их моделирования и, наконец, нивелировки таких отклонений в массовом транспортном процессе в силу их многочисленности. Получение вероятностных распределений интегральных характеристик трафика на перекрестке — таких, как количество ТС, проезжающих по определенной трассе за фазу светофорного цикла и временные задержки на входных и внутренних стоп-линиях, — согласно общей схеме метода Монте-Карло, состоит в многократном «разыгрывании» совокупности определяющих реализацию транспортного процесса случайных величин в соответствии с их вероятностными распределениями и расчете такой реализации как динамического процесса. На основе предыдущего опыта и в силу общих свойств такого процесса как объединяющего нефиксированное и изменяющееся во времени количество движущихся элементов со смешанной дискретно-непрерывной динамикой для него предложена модель в форме событийно-переключаемого процесса — класса гибридных систем.

3.1 Факторы, определяющие характеристики входного потока, и его формальное представление

Как массовое явление, ТП через перекресток имеет интегральные статические и динамические характеристики, на основе которых вероятностным образом определяются характеристики отдельных ТС для конкретных реализаций транспортного процесса за выбранный период в целом.

Статической характеристикой ТП является распределение в нем выделенных типов ТЕ [1]. В базовом приближении их определенное распределение применительно отдельно к пассажирским и грузовым перевозкам характеризует ГДС в целом или, по крайней мере, обширные районы, а определенное отношение пассажирских и грузовым перевозок характеризует отдельные улицы и часы дня. Применительно к проезду перекрестка имеют значение параметры ТЕ, определяющие динамический габарит при движении — объективные (длина ускорение торможения ТС при типовом состоянии дорожного покрытия) и субъективные (время реакции, погрешности оценивания расстояния до предшествующего ТС и его максимального ускорения торможения) [18].

Статическими характеристиками ТП, относящимися непосредственно к проезду перекрестка, являются интенсивности потоков на входных дорогах в целом или на отдельных полосах и их распределение между направлениями проезда перекрестка. В модель можно заложить естественное предположение, что при наличии нескольких полос входной дороги самоорганизация потока ведет к одинаковым интенсивностям на полосах, обслуживающих одно и то же направление проезда. Менее очевидно распределение потоков в том нередком случае, когда соседствуют полосы, одна из которых обслуживает одно направление (скажем, левая — поворот налево), а соседняя — два направления (в этом случае — поворот налево и прямолинейное движение). В этом случае выбор полосы для ТЕ, которым требуется двигаться по прямой, очевиден, а для поворачивающихся налево — нет. Можно исходить из предположения, что этот выбор обеспечивает выравнивание длин очередей перед стоп-линией на этих двух полосах в том случае, если проезд по обеим полосам происходит на одних и тех же фазах. Если же проезд по левой полосе допускается на двух фазах, а по правой — только на одной, последствия любого выбора для водителей, которым требуется ехать налево, не очевидны для них и, видимо, распределение едущих влево ТЕ между полосами может быть установлено только эмпирически.

Если максимальная интенсивность движения через перекресток, допускаемая заданной продолжительностью фаз СЦ, для некоторой входной полосы незначительно превышает интенсивность входного потока по ней, очередь перед стоп-линией на ней, как правило, не будет полностью исчезать в течение зеленых фаз; в этом случае моменты подъезда каждой ТЕ не влияют на характеристики прохождения перекрестка по трассе в целом, поскольку приходит в движение на каждой зеленой фазе только стоячая очередь, и то не полностью; пропускная способность трассы за время зеленой фазы используется полностью. Если это не так, использование пропускной способности трассы зависит от моментов достижения входа к перекрестку подъезжающими ТС. Здесь возможны варианты.

Входящий ТП на полосе может быть статистически стационарным или циклическим. Циклический характер сообщает ему светофорное регулирование на входящей дороге на сравнительно небольшом расстоянии от входа на перекресток (по нашим наблюдениям, в пределах полутора-двух километров) и в том случае, если основная доля входного потока регулируется таким светофором, а не заезжает сбоку с второстепенных дорог и парковок. Этот случай в основном наблюдается в крупных городах с многочисленными светофорами на перекрестках и некоторых пешеходных переходах, за исключением районов с преобладанием обширных промзон или протяженных жилых кварталов. В этом случае в модели представляется в форме случайного процесса входной поток в течение одного цикла светофора на входной дороге.

В малых и средних городах светофоры устанавливаются главным образом на проходящих через них магистралях (например, на Горьковском шоссе в г. Покров Владимирской области или на Фряновском шоссе — проспекте Мира — во Фрязине Московской области); остальные перекрестки не регулируются. В этом случае входной поток в модели представляется как статистически стационарный.

Объединяя сказанное, реализация случайного процесса прохождения ТП через перекресток в течение одного или нескольких циклов характеризуется следующим.

Конечными последовательностями ТЕ на каждой трассе, в которой ТЕ занумерованы в порядке прохождения трассы (иначе говоря, появления в начале трассы), включающей все ТЕ, которые либо в начальный момент находятся в пределах перекрестка, либо появляются на его входе до окончания рассматриваемого периода. Каждое ТЕ (номер трассы s , номер на трассе k) характеризуется вектором статических характеристик p_{sk} (принимающих значение из дискретного множества P) и направлением проезда, т.е. номером выходной полосы j_{sk} . В силу независимого появления в транспортном потоке разных транспортных единиц (появление цепочек взаимосвязанных ТЕ, как редкое явление, не рассматривается; оно при необходимости может быть учтено при усложнении

модели) считаем, что каждое очередное p_{sk} принимает возможное значение $p \in P$ независимо от всех остальных с известной вероятностью q_p . Что касается j_{sk} , то оно для неразветвляющихся трасс и для ТС, прошедших точку ветвления в начальный момент периода T , определено однозначно, а для ТЕ, находящихся в начальный момент на разветвляющейся трассе до точки ветвления, а также для поступающих впоследствии на вход такой трассы — независимо от остальных принимает возможные значения j_{sk} с вероятностями, соответствующими долям потока, проезжающим по такой трассе на соответствующий выход. Если, как было отмечено выше, СПР позволяет проехать по некоторому направлению более чем одной трассой, причем одна из трасс разветвляется, допускается возможность изменение таких долей от одного СЦ к следующему в результате адаптации ТП к условиям проезда регулируемого перекрестка.

Для определения моментов появления ТЕ на входе и их распределения между входящими трассами исходными данными являются: интенсивность потока на входной дороге в целом; распределение этого потока между направлениями; набор трасс, обслуживающих каждое направление; возможно (для некоторых вариантов модели), состояние очередей на каждой входной трассе на момент окончания последней зеленой фазы для этой трассы; последовательность моментов переключения светофора на каждой входной дороге, где он имеется.

Движение каждого ТС как динамический процесс в модели рассматривается с момента достижения одного из входов перекрестка. В соответствии с эмпирическими данными и теорией трех фаз ТП [19] в зависимости от интенсивности потока на конкретной входной полосе у входа перекрестка допускаются три состояния — свободный поток, при котором расстояние между последовательными ТС (их передними бамперами) больше динамического габарита; частично-связанное, когда образуются цепочки ТС, движущихся на минимальном безопасном расстоянии друг от друга и полностью связанное, когда в такой кластер сливаются все ТС, движущиеся по полосе у входа в перекресток. В случае циклического регулирования на входе все ТС, поступающие за один входной цикл, могут двигаться независимо, объединяться в несколько кластеров или в один кластер, и, наконец, объединенные кластеры могут сливаться. В соответствии с этими вариантами в последовательности ТС выделяются возможные качественные состояния каждого очередного ТС: 1) свободно движущийся или головной в своем кластере; 2) очередной в своем кластере. В первом случае скорость определяется как максимальная разрешенная или оптимальная для конкретного ТЕ, во втором — как максимальная безопасная скорость преследования предыдущего ТС на трассе.

Для полноты описания входного потока осталось определить одну дискретную и одну непрерывную случайные величины, распределения которых — при известном составе потока — зависят от его интенсивности. Эти зависимости — для дороги с заданным количеством полос — могут быть определены путем моделирования ТП на ней, как описано в статье [13].

3.2 Модель движения цепочек автомобилей (кластеров) через перекресток

В основу модели положены ранее введенные соотношения, описывающие движение последовательности ТС по одной полосе, дополненные условиями прохождения ОТ, ТСЛ и ТВнСЛ и изменения скорости при приближении к искривленным участкам и по завершении их проезда. Это модель *безопасного движения*, как и всякая другая модель ТП микроуровня, но с индивидуально воспринимаемыми водителями условиями безопасности.

По своей общей форме модель представляет текущее состояние процесса совокупностью переменных состояния с непрерывными и дискретными значениями (фазовых x -переменных и d -переменных качественного состояния), причем динамика первых описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями (возможно, зависящих от d -переменных), а вторые изменяют значения в момент достижения траекториями в x -переменных многообразий переключения, также могущих зависеть от d -переменных. В момент переключения возможны также скачки значений некоторых x -переменных (например, при переходе на новую трассу положение ТС начинает отсчитываться от ее начала, хотя физически оно не меняется мгновенно). Основными d -переменными для транспортных средств (всем им присваиваются уникальные номера i) являются номер текущего режима $j(i, t)$, номер предшественника (лидера) $L(i, t)$ и номер текущей трассы.

Для продольного движения транспортного средства вдоль участка трассы со скоростным ограничением выделяются режимы нормального разгона (1), равномерного движения с максимальной (или оптимальной для конкретного ТС) скоростью (2), поддержания минимального безопасного

расстояния до лидера — иначе говоря, плотного преследования (3), нормального торможения (4) и неподвижности (5). Движение единичного ТС по трассе при определенном текущем режиме $j(i, t)$, характеризующемся законом управления $U_i(\Delta x_i(t), \dot{x}_{L(i,t)}(t), \dot{x}_i(t), \ddot{x}_{L(i,t)}(t), j(i, t))$, где $\Delta x_i(t)$ — расстояние между задним бампером лидера и передним бампером преследователя, равное (в предположении, что лидер и преследователь находятся на одной и той же трассе) $x_{L(i,t)}(t) - x_i(t) - l_{L(i,t)}$ (здесь $l_{L(i,t)}$ — длина ТС-лидера), описывается соотношениями

$$\ddot{x}_i = U_i(\Delta x_i(t), \dot{x}_{L(i,t)}(t), \dot{x}_i(t), \ddot{x}_{L(i,t)}(t), j(i, t)). \quad (1)$$

Смена режима происходит в следующих случаях: с (1) на (2) — при достижении оптимальной скорости ($\dot{x}_i(t) = v_{OPT}(x_i(t))$); с (1) или (2) на (3) при сокращении расстояния до минимального безопасного ($\Delta x_i(t) = S_{SAFE}(\dot{x}_{L(i,t)}(t), \dot{x}_i(t))$). Смена режима с (1), (2) или (3) на (4) происходит в перечисленных далее случаях, в момент, после которого при нормальном торможении скорость снижается до заданной (нулевой или максимальной безопасной) на соответствующем рубеже (ТВнСЛ, границе окрестности ОТП или ОТС, точке начала поворота). При этом для случаев, кроме последнего, необходимость такого снижения зависит от рассчитываемого времени достижения этого рубежа: если этот рубеж — внутренняя СЛ, то при условии достижения его на красной фазе; если окрестность ОТП или ОТС — при условии, что эта ОТ занята автомобилем, достигающим ее по другой трассе. Режим (2) меняется на (1) при достижении конца поворота или после того, как предыдущее ТС прошло ОТП и перешло на трассу, отличную от трассы текущего ТС, режим (4) на (2) при достижении начала поворота и на (5) при достижении ТВнСЛ или границы окрестности ОТП или ОТС. Режим (5) меняется на (1) на внутренней СЛ при включении зеленого света или на границе окрестности ОТП при ее освобождении предыдущим ТС и на (3) в момент окончания проезда ОТС предыдущим ТС.

Ввиду того, что смена режимов в ряде случаев связана с состоянием ОТ или светофора или их изменениями, опишем последние. Обозначим T_{TLCJ0} момент начала первого цикла j -го СЦ, t_{TLCJk0} , t_{TLCJk1} — соответственно момент начала и окончания k -й фазы j -го СЦ относительно его начала. Тогда текущая фаза становится l -й в моменты времени $T_{TLCJ0} + lt_{TLCJk0}$, где l — порядковый номер текущего j -го СЦ. Что касается текущих состояний ОТП и ОТС, они характеризуются несколькими дискретными величинами. Во-первых, это признак занятости (занято-свободно), во вторых, для занятой ОТ это номер занимающего ее ТС и того ТС, которое будет проезжать ее следующим и номер трассы, на которой находится это следующее ТС. В рассматриваемой ситуации, когда СПР исключает активные ОТП и ОТС на всех фазах, порядок проезда каждой из них изменяется в начале каждой фазы после освобождения последним ТС с предыдущей фазы. Состояние ОТП также характеризуется признаком занятости, номером занимающего ее ТС, а также номером трассы, по которой оно будет двигаться по проезду ОТ. При совпадении трасс у лидера и преследователя номер лидера не меняется, в противном случае это номер предшествующего ТС на трассе после ОТП; номер трассы и $x_i(t)$ изменяется в момент захвата ОТП, а последний наступает — в случае свободного ОТП в момент достижения границ окрестности ОТП, в противном случае — в момент освобождения ОТП. Перечисленные соотношения полностью определяют модель движения через перекресток для рассматриваемого случая.

4 Порядок выполнения цикла расчетов по модели и использования его результатов

Расчет трафика в течение заданного периода включает попеременное определение моментов и характеристик ТС, появляющихся на входах перекрестка, и движения по отдельным трассам цепочек ТС, начавших движение в течение одной зеленой фазы. Расчет ведется: для трасс в соответствии с последовательностью зеленых фаз (не имеет значения порядок расчета трасс с одной зеленой фазой), в пределах цепочки — от начала к концу. Если до окончания зеленой фазы очередь перед ТСЛ для некоторой трассы иссякла, рассчитываются моменты появления и скорости новых ТС на входе этой трассы и их траектории от точки входа. По окончании расчета цепочки для одной трассы рассчитываются моменты и скорости появления остальных ТС, которые должны поступить на вход до начала новой зеленой фазы и участки их траекторий до этого момента.

Хотя естественным кажется одновременный расчет передвижения всех ТС в цепочке за каждый шаг модельного времени, более удобным оказывается другой порядок: расчет и запоминание целых траекторий в порядке прохождения трассы с запоминанием промежуточных положений и скоростей. Это связано, в частности, с рассмотрением некоторых альтернатив, выбора между торможением перед СЛ, ОТП или ОТС или проездом их без торможения. Мы исходим из предположения, что водители, как правило, принимают рациональное и обеспечивающее безопасность решение на основе своего опыта и интуиции, а применительно к проезду СЛ — основываясь также на дополнительной отображаемой информации в виде включения желтого света, мигания светофора в конце зеленой фазы или индикации количества секунд, оставшихся до смены фаз.

В силу стохастического характера процесса расчет движения в течение одного светофорного цикла позволяет определить лишь одну его реализацию, но многократный расчет дает статистическую оценку вероятностных распределений основных его характеристик, а именно, количества ТС, проезжающих по трассе, в т.ч. разветвляющейся, за один СЦ и временной задержки на этой трассе. Следует отметить, что независимость проезда набора разрешенных трасс на одной фазе, обеспечиваемая, как правило, используемой схемой пофазного разъезда, означает, что одним расчетом значения количества проехавших по трассе ТС как для заданной продолжительности фаз, так и для любого меньшего значения. Тем самым упомянутые распределения могут быть определены как параметрические, зависящие от продолжительности зеленой фазы. Именно такие зависимости, а не наборы рассчитанных траекторий на реализациях случайного процесса, и являются основным результатом моделирования. Тем самым порождаются данные, обеспечивающие выбор эффективных значений длительностей фаз светофорного цикла с учетом вероятностного характера трафика на перекрестке. Метод их оптимизации, предложенный в [16] в детерминированном приближении, может быть распространен и на вероятностную модель. В свою очередь, неразрешимость задачи определения продолжительности фаз, обеспечивающих прохождение входящих потоков в соответствии с их распределением по направлениям, указывает на вероятный непрекращающийся рост очередей перед стоп-линиями в период потоков такой интенсивности, что служит указанием на необходимость применения иных, нелокальных мер для преодоления или смягчения такой ситуации.

Заключение

Прогнозирование и управление трафиком в городской дорожной сети, особенно на перекрестках, где транспортный процесс имеет особенно сложный характер, требует использования математических моделей, учитывающих его вероятностный характер. Из этого обстоятельства вытекает ограниченная адекватность и во многих случаях неприменимость макроскопических моделей транспортных потоков, как основанных на гидродинамической аналогии, так и основанных на концепции транспортного равновесия. Существующие микроскопические модели случайных потоков и клеточных автоматов либо сталкиваются с существенными затруднениями при попытке представить трафик на перекрестке как случайный процесс, либо для этой цели никогда не применялись.

Предложенная в настоящей работе вероятностная модель ТП на регулируемом перекрестке в форме стохастически возмущенного событийно-переключаемого процесса развивает ранее введенные модели. Движение совокупности транспортных единиц представляется в виде целостной системы соотношений, объединяющих как уравнения безопасного движения отдельных ТС, так и взаимосвязи между ними, включая условия прохождения особых точек, а также реакцию на светофорное регулирование. Траектория каждого ТС определяется в рамках модели от момента появления на входе перекрестка и до выхода, закон управления по ускорению каждого ТС имеет индивидуальные параметры, выражающие как объективные характеристики автомобиля, так и восприятие водителем условий безопасности. Возможность использования такой информации подтверждается работами, в которых на основе мониторинга трафика на магистрали выявлен набор фактически встречающихся стилей вождения, как раз и характеризующихся определенными значениями параметров закона управления автомобилем.

При наличии актуальной информации о структуре транспортных потоков предлагаемая модель может служить инструментом вероятностного прогноза развития транспортной обстановки и выбора локального управления дорожным движением на перекрестках. Использование предложенной модели позволит предсказывать характеристики ТП через перекресток при различных параметрах светофорного регулирования на самом перекрестке, а также въездных и выездных дорогах. К их числу относятся средние характеристики интенсивности потоков через перекресток по разным

направлениям, временные задержки, а также вероятностные отклонения от них. Могут быть предсказаны ситуации затора с неограниченным ростом очередей на некоторых входных дорогах.

Литература

1. Яшина М.В., Таташев А.Г., Доткулова А.С., Сусоев Н.П. Детерминированно-стохастическая модель трафика с вариацией психофизиологических свойств водителей // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. Т. 10. 2019, № 6. — С. 74–79.
2. Валуев А.М. Моделирование вероятностных и псевдослучайных факторов в прохождении транспортных потоков через регулируемые перекрестки // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020): труды Тринадцатой междунар. конф., 28-30 сентября 2020 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; М.: ИПУ РАН. — С. 496–502.
3. АвтоАтлас Москвы с дорожными знаками средний. Вып. 13. – М.: ООО «АГТ Геоцентр», 2013. – 104 с.
4. Treiber M., Kesting A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. — Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. — xiii+504 p.
5. Живоглядов В.Г. Теория движения транспортных и пешеходных потоков. Ростов н/Д: Известия вузов Сев.-Кавк. региона, 2005. — 1082 с.
6. Babicheva T. S. The use of queuing theory at research and optimization of traffic on the signal-controlled road intersections // Procedia Computer Science. Vol. 55, 2015. — P. 469–478.
7. Афанасьева Л.Г., Булинская Е.В. Математические модели транспортных систем, основанные на теории очередей // Труды МФТИ. Т. 2, 2010. № 4 (8). — С. 6–21.
8. Danilevičius A., Bogdevičius M. Investigation of traffic light switching period affect for traffic flow dynamic processes using discrete model of traffic flow // Procedia Engineering. Vol. 187, 2017. —P. 198-205,
9. Derai S., Ghoul R.H. Control isolated intersections with hybrid petri nets and hybrid automaton // EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica. Vol. 65, 2017, № 3.— P. 112–116.
10. Kerner B.S., Klenov S.L., Wolf D.E. Cellular automata approach to three-phase traffic theory // Journal of Physics A: Mathematical and General. Vol. 35, 2002. № 47. –P. 9971–10013.
11. Калинин И.Н., Глухарев К.К. Исследование интегральных характеристик перекрестков при помощи микроскопических моделей транспортных потоков // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — Т. 6. — № 4. — С. 523–534.
12. Ерёмин В.М. Концептуальная модель функционирования системы ВАДС как основа компьютерной имитации //САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – №. 1 (2).С. 90–93.
13. Валуев А.М. Моделирование транспортных процессов в формализме гибридных систем // XII Всероссийское Собрание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16–19 июня 2014 г.: Труды [Электронный ресурс].— С. 5033–5043.
14. Валуев А.М., Соловьёв А.А. Моделирование зависимостей, характеризующих динамику автотранспортных потоков // Информатизация и связь. 2018. №2. — С. 106–113.
15. Вибрационные процессы, виброзащита в машиноведении. Отчет о НИР за 2018г. по теме 6-13 (промежуточный). Часть 2. Динамика мехатронных робототехнических комплексов, динамика транспортных потоков. / Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Овчинников Н.М. и др. — М.: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2018. — 126 с.
16. Valuev A.M. Modeling of the Transport Flow through Crossroads with Merging and Divergence Points // Proceedings of 2018 Eleventh International Conference “Management of Large-Scale System Development” (MLSD). Russia, Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, October 1-3, 2018. Ed. by Anatoly Tsvirkun. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8551915>. — P 1–3.
17. Соловьёв А.А., Валуев А.М. Проблема оптимизации управления перекрестком с многостадийным прохождением транспортных потоков // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020): труды Тринадцатой междунар. конф., 28-30 сентября 2020 г., Москва / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна; М.: ИПУ.— С. 1107–1116.
18. Курьянова О. Е. Безопасность транспортного процесса: методические указания к практическим работам для специалистов направления подготовки 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства». — М.: МАДИ. 2016, – 60 с.
19. Кленов С.Л. Теория Кернера трех фаз в транспортном потоке — новый теоретический базис для интеллектуальных транспортных технологий // Труды МФТИ. Т. 2, 2010. № 4(8). – С. 75–89.