

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМАЛИЗМЕ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ

А.М. Валуев

Московский государственный горный университет
Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 6, МГГУ
E-mail: valuev.online@gmail.com

Ключевые слова: транспортные потоки, модель следования за лидером, модель дискретного транспортного потока, гибридные системы, событийно-переключаемые процессы

Аннотация: В докладе развивается общая модель дискретного управляемого транспортного потока (ТП) как совокупности взаимосвязанных движений отдельных транспортных единиц (ТЕ) в сменяющихся режимах и переключений регуляторов. В отличие от предназначенного для компьютерных экспериментов агентного моделирования, когда каждая ТЕ программно представляется в виде объекта, взаимодействующего с ближайшими объектами, без явного описания всех взаимосвязей, предлагаемый подход позволяет выполнять аналитическое и комбинированное исследование характеристик потоков. Модель допускает возможность выбора маршрутов движения ТЕ и управления регуляторами на основе информации о состоянии и динамике ТП, которую можно рассчитывать по модели. Модель позволяет исследовать структуру сети и дорожных сооружений и организацию дорожного движения при известном спросе на передвижения.

1. Введение

В математическом моделировании автотранспортных потоков выделяются несколько существенно различающихся между собой подходов, которые, в свою очередь, могут быть объединены в две большие основные группы: макро моделирование и микро моделирование, между которыми стоит не получившее широкого развития мезомоделирование [1]. Микро моделирование основано на математическом описании движения каждого единичного транспортного средства и в этом смысле является более естественным, не предполагающим специальных трудно проверяемых допущений, которые характерны для макромоделей.

В свою очередь, выделяются две группы микромоделей: модели клеточных автоматов [2, 3] и модели, в которых движение отдельного автомобиля описывается в соответствии с законами механики с учетом управления со стороны водителей, обеспечивающего безопасность движения. Базовым элементом моделей, основанных на динамике системы материальных точек, является «модель следования за лидером» [4]. В виду того, что в данных моделях используется естественное представление о непрерывном движении автомобилей в пространстве и при этом имеется возможность учитывать эмпирически установленные формы закона безопасной дистанции, то такие модели принципиально более точны, чем модели клеточных автоматов, для которых характерна дискретизация движения во времени и пространстве.

Микромоделирование в терминах моделей следования за лидером может иметь форму имитационного моделирования [5], основанного на агентном подходе, которое не требует в обязательном порядке построения единой модели дискретного потока, и форму аналитического или комбинированного исследования, для которого такая модель необходима. Использование аналитических методов наряду с вычислительными экспериментами существенно обогащают возможности исследований.

Однако систематического развития целостных моделей транспортного потока как взаимосвязанного движения отдельных ТЕ до недавнего времени не наблюдалось нигде в мире, о чем свидетельствуют, в частности, труды регулярно проводимых международных конференций под общим названием “Traffic and granular flows” (Автотранспортные потоки и гранулированные среды), например [6]. В работах лаборатории математического моделирования ИМАШ РАН последних лет выдвинута концепция модели дискретного управляемого транспортного потока [7, 8], которая, однако, в этих работах не приняла достаточно общего вида. Настоящий доклад посвящен дальнейшему развитию этой концепции с использованием формализма гибридных систем.

2. Формализм гибридных событийно-переключаемых систем и его связь с проблемой управления движением

Гибридные системы (ГС) – чрезвычайно широкий класс динамических систем (как правило, управляемых), отличающихся сочетанием количественной и качественной динамики [9-12]. Среди них выделяются, в частности, системы с импульсными управлениями, в которых скачки в значениях фазовых переменных могут происходить в произвольные моменты времени, между которыми динамика системы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений традиционного типа, правые части которых непрерывно с достаточной степенью гладкости зависят от фазовых переменных и времени [13].

В отличие от них, в событийно-переключаемых системах момент качественного изменения не произволен, а связан с достижением траекторией некоторого многообразия, после чего, помимо скачка в значениях компонент фазового вектора, может произойти изменение его размерности, как и размерности вектора управления; наиболее характерным следствием переключения является изменение уравнений движения. Многостадийные процессы космического полета послужили первоначальным источником моделей ГС с переключениями на многообразиях [14]. Однако такие ГС отличались фиксированными последовательностями переключений. В работах В.В. Величенко над моделью управления катастрофами (1992-1997) [15] было введение понятия сценария — последовательности «сцен», т.е. различных качественных состояний «катастрофического», т.е. испытывающего мгновенные качественные трансформации процесса. Модели управления катастрофами – значительно более широкий класс гибридных систем, чем модели управляемых разрывных систем типа [14]. Оказалось, однако, что для разграничения сцен и определения сценария недостаточно ввести границы в фазовом пространстве, на которых происходит переход от одной сцены к другой. Одна из причин – для качественных скачков характерно изменение размерности фазового вектора, и значений отдельных его компонент, а следовательно, скачок нельзя описать как результат перехода из одной области фазового пространства в другую. Необходимо определить дискретное (качественное) состояние – вектор показателей, характеризующих каждую сцену и остающихся неизменными в течение сцены. Наличие нескольких возможных сценариев, определяемых управлением, имеет место для управляемого процесса, если для каждой сцены есть несколько многообразий в его фазовом пространстве, на кото-

рых происходят трансформации разного типа. Это очень характерно для транспортных процессов, характеризующихся большим количеством участников. Ниже рассматривается класс моделей, соответствующий приведенной качественной характеристике.

Переключения для процессов в транспортных сетях характерны для сетей самого разного типа – носителей дискретного потока (автодороги, железные дороги, система воздушных коридоров для самолетов гражданской авиации) и условно-непрерывного потока (продуктопроводы, конвейерные системы). Качественно меняется состояние участков сети (количество транспортных единиц или транспортируемых партий), переключателей (светофоров, шлагбаумов и т.п.). Меняется и состояние транспортных единиц (режим движения) в связи достижением пространственных рубежей (границы перекрестка, узловой станции, верхнего эшелона при полете самолета) или скоростных рубежей.

Весьма характерны для транспортных систем разного типа условия безопасности, связывающие расстояния и/или скорости двух последовательных транспортных единиц на одном участке (например, нормы продольного эшелонирования для воздушного движения) или моменты времени прохождения определенных рубежей (стрелочных переводов для железнодорожного транспорта). Общий характер условий безопасности определяет особенности класса гибридных систем, введенного в целях моделирования транспортных процессов.

3. Общая модель автотранспортного потока в формализме гибридных систем

Модели транспортных потоков микроуровня (как правило, укладываемые в схему «модели следования за лидером») представляют собою лишь описание движения отдельного автотранспортного средства (АТС) во взаимосвязи с одним или несколькими ближайшими. Однако смена других параметров транспортной ситуации (например, переключение светофора, открытие-закрытие шлагбаума), а также выбор направления дальнейшего движения в точках расхождения потоков этими моделями не затрагиваются. При имитационном моделировании транспортного потока для этих ситуаций в компьютерно реализованную модель закладываются какие-то правила, однако они явно не формулируются и поэтому исследовать их обоснованность невозможно. Это обстоятельство затрудняет также получение с помощью вычислительных экспериментов статистических характеристик потока, их зависимостей от различных факторов.

Напротив, целостная модель дискретного транспортного потока принципиально позволяет установить качественный характер транспортных процессов на основе аналитического исследования модели и тем самым, в частности, дать рекомендации в отношении организации вычислительных экспериментов. Облегчается и само выполнение вычислительного эксперимента, т.к. для его постановки достаточно определить количественные и структурные характеристики транспортной системы, являющиеся параметрами модели.

Поток автотранспортных средств (АТС) в городской дорожной сети (ГДС) представляет собой единое целое в силу определенной организации дорожного движения и условий безопасности, которых придерживаются его участники. Автотранспортный поток (АТП) на одной полосе дороги без перекрестков может быть представлен как система материальных точек с удерживающими и недерживающими связями [7]. На основании развития модели [7] предлагается общий метод построения моделей дискретных автотранспортных потоков в формализме гибридных систем с учетом опыта моделирования систем с разнотипными асинхронными переключениями [16, 17].

Мы рассматриваем одиночные и групповые элементы транспортной системы; последние можно назвать очередями; количество и состав очереди многократно изменяется. Очереди состоят из отдельных АТС. Одиночными элементами являются переключатели направления движения и/или состояния движение/покой (светофоры, шлагбаумы, реверсивные переключатели, а также точки коммутации потоков).

Транспортный процесс разбивается моментами переключения состояния своих элементов — одиночных, групп и АТС в составе групп — на временные этапы, внутри которых характер динамики постоянен. Как одиночные элементы, так и АТС в составе очереди между переключениями, непосредственно их затрагивающими, подчиняются обыкновенным дифференциальным уравнениям с непрерывными, непрерывно дифференцируемыми правыми частями, зависящими от текущего качественного состояния d . Т.е., для l -го этапа

$$(1) \quad dx_i(t,l)/dt = f_i(d(l), x(t,l), U_i(d(l), x(t,l))).$$

Фазовые переменные для АТС характеризуют их положение на носителе очереди (участке транспортной сети) и скорость движения, а для припаркованных АТС — время до расчетного момента выезда с парковки. Для общности рассмотрения нужно с единых позиций трактовать собственно парковочные сооружения, парковки у тротуара и целые «парковочные зоны» [7] (ПЗ) — например, жилые кварталы. Для регулятора-переключателя фазовой переменной является время нахождения в текущем состоянии. Применительно к таким фазовым переменным легко охарактеризовать переключения по заданной временной программе и некоторые другие виды переключения (например, переключение железнодорожного светофора через определенное время после прохождения последнего состава). Компоненты вектора $d(l)$ характеризуют состояния переключателей, очередей в целом, режим движения (например, разгон, торможение, неподвижность, движение с постоянной скоростью, поддержание минимальной безопасной дистанции, перестроение в смежную очередь или паркование у тротуара) и другие характеристики отдельных ТС, например, номер предшествующего ТС в своей и смежной очереди.

В форме (1) может быть выражена и динамика состояния переключателей, но в этом случае зависимость правой части от $U_i(d(l), x(t,l))$ отсутствует.

Мы полагаем, что закон управления $U_i(d(l), x(t,l))$ выражает цель и условия движения в зависимости от режима движения i -го ТС, в частности: движение с максимальным ускорением до достижения максимальной возможной или желаемой скорости, торможение лидера очереди на красный свет при достаточном приближении к границе перекрестка, поддержание минимальной безопасной дистанции, маневр перестроения в смежную полосу или занятия свободного парковочного места у тротуара при соответствующем режиме. Реально $U_i(d(l), x(t,l))$ зависит, как правило, всего от нескольких компонент обоих аргументов. Наиболее сложный случай — движение цепочки автомобилей, связанных минимальной безопасной дистанцией (кластера); для простой модели движения имеем рекурсивное определение ускорения от начала до конца кластера.

Очередное переключение, завершающее этап, и его момент $T(l)$ — определяются альтернативными условиями

$$(2) \quad g_{j(l)}(d(l), x(T(l), l), U(d(l), x(T(l), l)), l), T(l)) = 0, j(l) \in J(d(l)),$$

$$(3) \quad g_j(d(l), x(T(l), l), U(d(l), x(T(l), l)), l), T(l)) < 0, j \in J(d(l)) \setminus \{j(l)\}.$$

При этом предполагается, что

$$(4) \quad dg_j(d(l), x(t,l), U(d(l), x(t,l)), l), t) / dt > 0, j \in J(d(l)),$$

если

$$(5) \quad 0 \geq g_j(d(l), x(t, l), U(d(l), x(t, l)), l), t) \geq -G_j.$$

Результатом переключения является изменение состояния нескольких компонент векторов d и, возможно, x (заметим, что АТС, перейдя из одной очереди в другую, изменяет переменную своего положения, поскольку она теперь измеряется относительно носителя новой очереди). Набор изменяемых компонент зависит от типа переключения и $d(l)$. Остальные компоненты сохраняют свои значения:

$$(6) \quad d_i(l+1) = D_{j(l)}(d(l)), i \in I_{D_{j(l)}}(d(l)), \quad d_i(l+1) = d_i(l), i \notin I_{D_{j(l)}}(d(l)),$$

$$(7) \quad x_i(T(l), l+1) = X_{j(l)}(d(l), x(T(l), l), T(l)), i \in I_{X_{j(l)}}(d(l)),$$

$$(8) \quad x_i(T(l), l+1) = x_i(T(l), l), i \notin I_{X_{j(l)}}(d(l)).$$

Огранивая период рассмотрения временным диапазоном $[T_0, T_1]$, имеем в качестве начального условия

$$(9) \quad T(0) = T_0,$$

а для определения количества этапов условие

$$(10) \quad T(N) = T_1,$$

которое, как легко видеть, имеет форму условия (2). Таким образом, введена общая модель (1)–(10) дискретного транспортного процесса.

4. Примеры описания автотранспортных потоков в форме введенной модели

4.1. АТП на однополосной дороге

Рассмотрим движение АТС по одной полосе длиной L_1 без обгона, где в начале полосы появляются с нулевой скоростью автомобили в определенный для каждого из них момент времени (T_{IN_i}). Для каждого АТС имеется своя желательная скорость, которая может больше или меньше максимальной разрешенной скорости $V_{\max 0}$. Таким образом, в режиме свободного движения скорость i -го АТС увеличивается до $V_{\max i}$, не превышающей $V_{\max 0}$.

В конце полосы размещен светофор, либо разрешающий, либо запрещающий выход, и работающий по заданной временной программе. Предполагается следующее поведение АТС перед светофором в момент включения красного сигнала. Для каждого АТС при его текущем положении и скорости существует рубеж, достигнув которого при последующем максимальном торможении оно останавливается на границе перекрестка, на расстоянии ΔL от конца полосы. Мы предполагаем, что АТС, прошедшие такой рубеж торможения, при включении красного сигнала продолжают прежнее движение с тем, чтобы пересечь перекресток в кратчайшее время, а прочие переходят в режим максимального торможения при достижении своего рубежа торможения на красной фазе светофора. (В действительности, только одно АТС переходит в режим торможения на своем рубеже, последующие же — раньше, ради соблюдения безопасной дистанции).

При включении зеленого сигнала режим движения тормозящих АТС изменяется. Ближайший к перекрестку автомобиль (в типичной ситуации он неподвижен) начинает движение с максимальным ускорением, несколько следующих оказываются связанными с ним минимальным безопасным расстоянием.

Для АТС вводятся следующие режимы: $d_i = 1$ – пребывание в ПЗ до момента $T_{IN\ i}$, $d_i = 2$ – разгон до $V_{\max\ i}$, $d_i = 3$ – равномерное движение со скоростью $V_{\max\ i}$, $d_i = 4$ – режим поддержания минимальной безопасной дистанции до следующего АТС, $d_i = 5$ – торможение, $d_i = 6$ – остановка. Кроме того, в модели неявно определяется d_{0i} – тип взаимосвязи АТС с границей перекрестка. Если текущая скорость допускает торможение до нуля ранее, момента достижения границы перекрестка, $d_{0i} = 0$, иначе $d_{0i} = 1$. При движении по полосе d_{0i} изменяет значение с 0 на 1 один раз, т.к. такое переключение происходит в момент t_{0i} , когда при максимальном торможении АТС останавливается в момент достижения границы перекрестка t_{1i} . Если после этого имеет место максимальное торможение, t_{1i} не изменяется, иначе t_{1i} уменьшается, а скорость в момент t_{1i} , наоборот, увеличивается. В любом случае возврат в состояние $d_{0i} = 0$ оказывается невозможным.

Параметрами АТС являются длина L_i , максимальное ускорение разгона $a_{\max\ i}$ и торможения $b_{\max\ i}$, параметрами водителя – время реакции R_i .

В режиме $d_i = 4$ должно быть определено $j_{PRE\ i}$ – порядковый номер АТС, с которого начинается кластер – цепочка автомобилей, связанных минимальным безопасным расстоянием между ними – к которому принадлежит данное АТС.

Компонентами d для очереди на полосе являются номер первого (лидера очереди) и последнего автомобиля в ней i_{01}, i_{11} .

Для находящихся на полосе АТС фазовыми координатами являются координата s (расстояние от начала полосы) и скорость v . Имеем уравнения динамики

$$(11) \quad ds_i(t, l) / dt = v_i(t, l), \quad dv_i(t, l) / dt = A_i(d(l), x(t, l))$$

(для $s_i(t, l)$ и $v_i(t, l)$ аргумент l ниже опускается, т.к. положения и скорости мгновенно не изменяются при переходе от одного этапа к другому). При этом для соответствующих режимов имеем при $d_i(l) = 1, 2, 3, 5, 6$

$$(12) \quad A_i(d(l), x_i(t, l)) = A_{0i}(d_i(l)),$$

причем

$$(13) \quad A_{0i}(1) = A_{0i}(3) = A_{0i}(6) = 0, \quad A_{0i}(2) = a_{\max\ i}, \quad A_{0i}(5) = b_{\max\ i}.$$

Для случая $d_i(l) = 4$ определение $A_i(d(l), x(t, l))$ сложнее. Предположим, что зависимость безопасной дистанции (между задним бампером предшествующего и передним последующего АТС) от скоростей автомобилей и их параметров выражается функцией $S_{SAFE}(v_0, v_1, R_1, b_1)$, монотонно убывающей по v_0 и b_1 , возрастающей по v_1 и R_1 . Ее поддержание выражается условием

$$d(s_0 - L_0 - s_1 - S_{SAFE}(v_0, v_1, R_1, b_{\max\ 1})) / dt = 0,$$

откуда имеем выражение ускорения последующего АТС a_1 через ускорение предыдущего a_0 .

$$(14) \quad a_1 = \frac{v_0 - v_1 - a_0 \partial S_{SAFE}(v_0, v_1, R_1, b_{\max\ 1}) / \partial v_0}{\partial S_{SAFE}(v_0, v_1, R_1, b_{\max\ 1}) / \partial v_1}.$$

Используя (14) как рекуррентные соотношения, определяем требуемое ускорение i -го АТС при условии, что кластер из взаимосвязанных автомобилей начинается АТС с номером $j < i$, в общем виде как

$$(15) \quad A_{\text{SAFE } i-j}(a_j, v_j, \dots, v_i, R_{j+1}, \dots, R_i, b_{\max j+1}, \dots, b_{\max i}).$$

Уравнения динамики (11)–(15) должны быть дополнены условиями переключения с одного режима на другой. Эти условия просты, а набор возможных переключений зависит от текущего режима. Так, при $d_i(l) = 2$ и $d_i(l) = 4$ возможно переключение на режим $d_i(l+1) = 3$ по условию

$$(16) \quad v_i(t) = V_{\max i}.$$

Переключение на режим $d_i(l+1) = 4$ может произойти в режиме $d_i(l) = 2$ и $d_i(l) = 3$ по условию

$$(17) \quad S_{\text{SAFE}}(v_{i-1}(t), v_i(t), R_i, b_{\max i}) = s_{i-1}(t) - L_i - s_i(t).$$

Наконец, переключение лидера очереди ($i = i_{01}(l)$) на режим торможения происходит при достижении рубежа торможения перед перекрестком по условию

$$(18) \quad S_{\text{SAFE}}(0, v_i(t), R_i, b_{\max i}) = L_1 - \Delta L - s_i(t)$$

в случае если это происходит на красной фазе светофора.

Выход из очереди ее лидера с соответствующими изменениями

$$(19) \quad j = i_{01}(l+1) = i_{01}(l) + 1; \quad d_j(l+1) = 2, \quad \text{если } d_j(l) = 4,$$

происходит в момент пересечения лидером границы полосы

$$(20) \quad s_{j-1}(t) = L_1,$$

а добавление в конец очереди нового АТС — по условию

$$(21) \quad T_{\text{IN } j} = t, \quad j = i_{11}(l) + 1.$$

Соотношения (11)–(21) вместе с приведенными в тексте соотношениями типа (6) и простыми условиями переключения для светофоров, работающих по заданной программе, представляют собой замкнутую модель, позволяющую рассчитывать динамику АТП на полосе при заданных начальных и граничных условиях. Последовательность расчета по существу представляет собой решение задач и Коши для системы (11)–(15), для которых начальным моментом служит начало очередного этапа. На траекториях (11)–(15) условия (16)–(18), (20), (21) для моментов переключений становятся уравнениями относительно скалярного аргумента – времени. Поэтому момент первого из набора альтернативных событий, которое и завершает этап, может быть определен простыми методами вычислительной математики. После этого определяются новые значения переменных качественного состояния из соотношений типа (6) и вычисления повторяются до тех пор, пока очередное переключение не выйдет за границы рассматриваемого периода.

При некоторых упрощающих предположениях на основе модели (11)–(21) можно сделать некоторые качественные выводы.

Например, для однородного потока, в котором параметры АТС одинаковы, а $T_{\text{IN } j} = T_{\text{IN } 0} + j\Delta T$, можно утверждать при достаточно естественных предположениях о свойствах зависимости $S_{\text{SAFE}}(v_0, v_1, R_1, b_1)$, что при отсутствии светофорного регулирования существует такое ΔT_{\min} , что при любом $\Delta T > \Delta T_{\min}$, устанавливается предельное распределение скоростей

$$v_j(t - T_{\text{IN } j}; \Delta T) \xrightarrow{j \rightarrow \infty} v^*(t, \Delta T),$$

причем при

$$V_{\max} \Delta T > S_{\text{SAFE}}(V_{\max}, V_{\max}, R, b_{\max}) + L_0$$

$v^*(t, \Delta T)$ не зависит от ΔT , а при меньших ΔT монотонно убывает при любом фиксированном t . Несложно также приближенно определить значение ΔT_{\min} при заданных параметрах АТП.

Если же имеется циклическое светофорное регулирование и продолжительность светофорного цикла равна $n\Delta T$, то при достаточно больших значениях ΔT имеет место сходимость $v_{jn+K}(t - T_{\text{IN } jn+K}, \Delta T)$ к $v_K^*(t; \Delta T)$ при любом $K = 1, \dots, n$.

4.2. Моделирование коммутации АТП на перекрестках и развязках

Микроскопическое моделирование АТП как потока, состоящего из отдельных АТС, требует детального описания прохождения АТС через области перекрестков и точки схождения и расхождения потоков. С другой стороны, только оно и дает возможность принять в расчет конкретное устройство таких коммутаторов и организацию движения на них.

Рассматриваемый аспект движения мы представляем как процесс изменения состояния *элементарных коммутаторов (ЭК)*, представляющих собой точки схождения, расхождения или пересечения потоков. Каждый коммутатор в определенный момент времени представляется либо свободным, либо занятым конкретным АТС. В последнем случае он занимается на время прохождения АТС через него с ограниченной скоростью, и может образовываться очередь на прохождение данного ЭК, порядок в которой определяется правилами приоритета.

4.3. Моделирование адаптации АТП и системы управления ими к состоянию АТП

Модель АТП на сети, составленная из моделей типа (11)–(21) и моделей прохождения коммутаторов, позволяет вычислять оценки времени прохождения участков дорог и перекрестков — мгновенные или усредненные по временным интервалам. Например, путем вычисления средней скорости АТП на участке (это самое простое) или, скажем, расчетного времени прохождения участка исходя из фактической зависимости скорости от положения АТП. В последнем случае на основе текущих положений АТП участок делится на сегменты, временем прохождения сегмента считается время движения по нему со скоростью находящегося на нем автомобиля, и время прохождения всего складывается из времен для всех сегментов. Усреднение по времени светофорного цикла в этом случае весьма уместно. Вычисление в модели этих величин позволяет делать прогнозы времени прохождения любого маршрута и тем самым позволяет предугадать возможный выбор маршрута информированными участниками дорожного движения. Можно ожидать, что в условиях массового движения и реальной возможности выбора одного из альтернативных маршрутов предпочтение водителями более быстрых маршрутов, определяемых на основе информированности такого рода, должно снижать общую нагрузку на транспортную сеть. Безусловно, это предположение — лишь гипотеза и нуждается в установлении условий, когда оно оказывается справедливым). Важно, что такое информирование и введение сервиса маршрутизации конкретных поездок реализуемо в современных условиях. Однако последствия такого выбора маршрутов в массовом порядке целесообразно проверить в ходе вычислительных экспериментов, пока он не стал распространенным явлением.

То же самое можно сказать о разных способах адаптивного управления светофорами на основе той же информации, а также длины очередей, а возможно, и других величин, которые можно вычислить по моделям дискретного АТП.

5. Об организации вычислительных экспериментов по исследованию организации движения

Как было видно из предыдущего, расчет динамики АТП на одном однородном участке дороги при заданных начальных и граничных условиях представляет собой не слишком сложную вычислительную задачу – комбинацию типовых вычислительных задач. Что касается прохождения автотранспортными потоками более сложных участков – фрагментов АТП, содержащих перекрестки и дорожные сооружения, – здесь возникает вопрос о возможности реализации рассматриваемых транспортных корреспонденций с помощью разных маршрутов. При рассмотрении конкретного перекрестка можно исходить из относительного постоянства пропорций разделения и соединения потоков – т.н. матриц перемешивания. При сопоставлении альтернативной организации движения это предположение неадекватно. С другой стороны, выбор оптимального маршрута, как по его длине, так и по расчетному времени прохождения для небольшой сети легко решается даже с учетом динамики характеристик сети [18].

Типичная задача предполагает известное распределение корреспонденций между входами и выходами фрагмента сети. По существу, наиболее уместно было бы считать, что входящий в сеть из определенного источника автомобиль случайным образом, с известной вероятностью, равной доле соответствующей корреспонденции, выбирает сток – выход из сети. С другой стороны, поддержание относительно постоянной пропорции при реализации корреспонденций может быть реализовано и чисто детерминированным путем в виде формирования очередности выбора выходов для данного входа на основе введения в модель соответствующих правил текущих приоритетов для направлений движения. В любом случае массовый характер автомобильного движения нивелирует такого рода флуктуации.

Приведем некоторые примеры результатов вычислительных экспериментов. На рис. 1 показаны результаты обработки вычислительных экспериментов в отношении движения АТС по однополосной дороге [19].

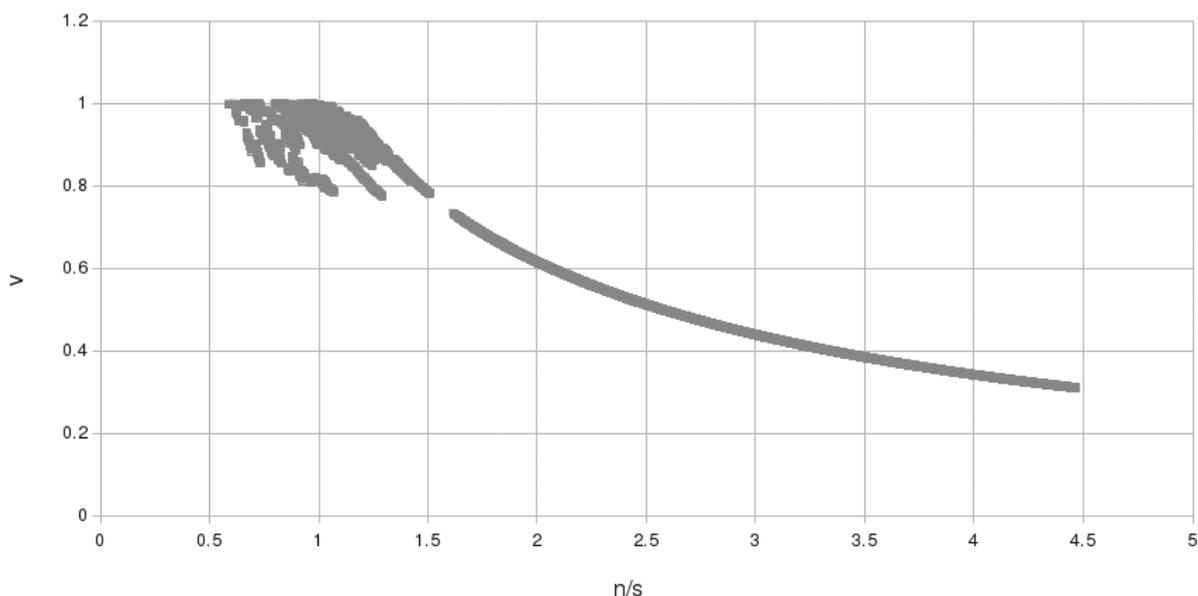


Рис. 1. Зависимость средней скорости движения от плотности АТП (количества АТС на единицу длины полосы).

Максимальная скорость движения ограничена условным значением 1, темп поступления АТС был разным в разных экспериментах. Показанная зависимость скорости от плотности объединяет данные нескольких экспериментов. Рис. 1 показывает, что при малой плотности имеет место большой разброс значений, но начиная с некоторой граничной плотности точки практически ложатся на одну кривую. На рис. 2 [8] приведены результаты исследования нерегулируемого перекрестка двухрядных дорог – график зависимости времени возникновения блокировки на перекрестке от обратной интенсивности (среднего интервала между моментами входа частиц в перекресток). Различные кривые соответствуют различным коэффициентам деления потока f – отношению числа частиц, поворачивающих налево, к числу частиц, проезжающих прямо. Так, при $\tau_{\text{входа}} < 4,5$ с блокировка возникает за постоянное время (порядка времени наполнения перекрестка), а при $\tau_{\text{входа}} > 5,5$ с не возникает вовсе (кроме случая $f=1$).

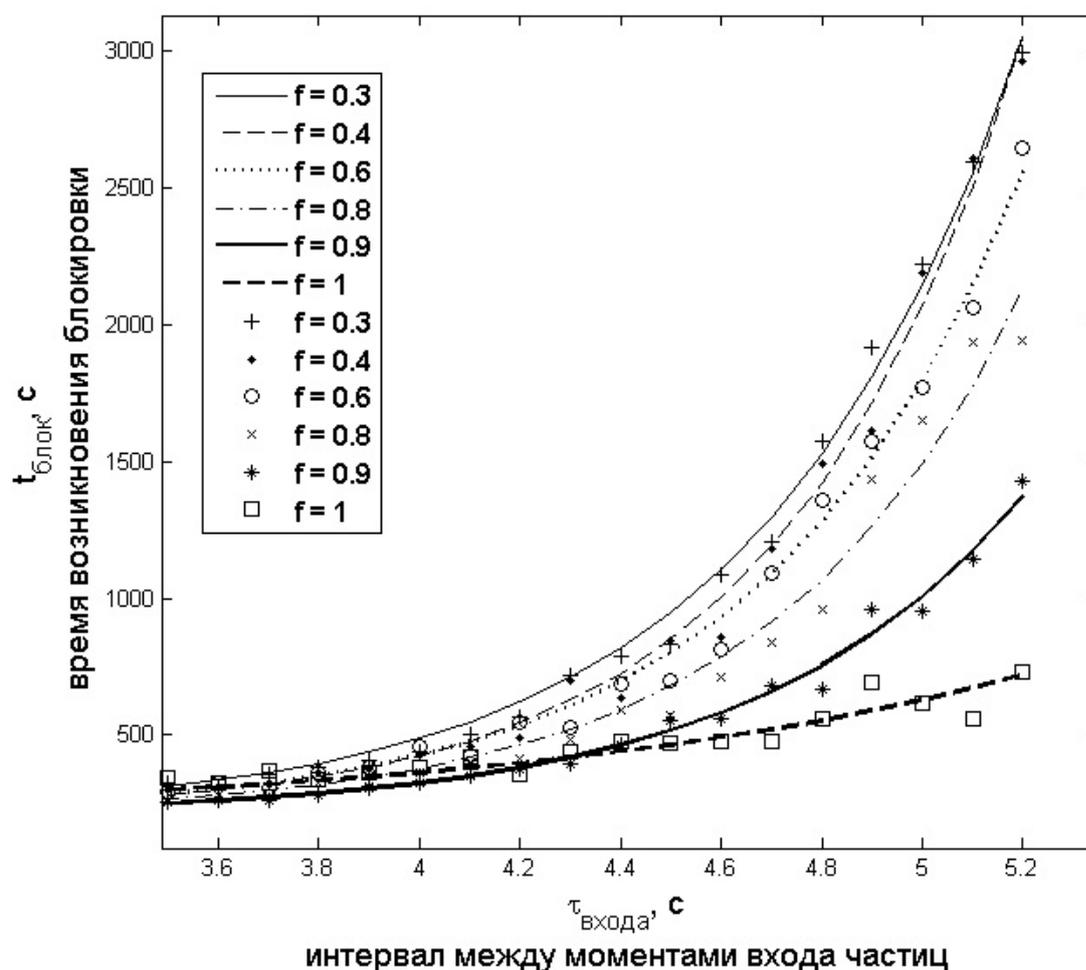


Рис. 2. Время возникновения блокировки для нерегулируемого перекрестка.

6. Заключение

Модель дискретного автотранспортного потока применялась до сих пор в своих частных формах и для рассмотрения формирования периодических режимов и растущих пробок на фрагментах сети малого масштаба [8, 19]. Благодаря единой формализации получает возможность применения для исследования самых разных аспектов устройст-

ва транспортных сетей и управления движением. Важно, что в модели допускаются разные выражения для закона безопасной дистанции, поскольку эмпирически установленные зависимости не имеют универсального характера.

При изучении транспортных сетей большого масштаба детализация с точностью до движения отдельных автомобилей едва ли целесообразна, хотя и реализуема; более уместной представляется использование усредненных по времени и длине участка зависимостей типа тех, которые вводились выше. То же самое касается и прохождения коммутаторов. Однако сами эти усредненные зависимости целесообразно получать путем обработки данных вычислительных экспериментов с моделями дискретного АТП. Для случая движения с перестроениями между полосами и возможностями парковки на обочине трудно предложить убедительную альтернативу.

Список литературы

1. Daganzo C.F. Fundamentals of transportation and traffic operations. New York: Elsevier Science Inc., 1997.
2. Вероятностные и имитационные подходы к оптимизации автодорожного движения / Под ред. чл.-корр. РАН В.М. Приходько. М.: Мир, 2003. 368 с.
3. Nagel K., Wolf D.E., Wagner P., Simon P. Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach // Physical Review. 1998. Vol. 58. No. 2.
4. Helbing D., Hennecke A., Treiber M. Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities // Physical Review Letters. 1999. Vol. 82. P. 4360-4363.
5. Бадалян А.М., Еремин В.М. Компьютерное моделирование конфликтных ситуаций для оценки уровня безопасности движения на двухполосных автомобильных дорогах. М.: ИКФ «Каталог», 2007.
6. Traffic and Granular Flow' 11. / Ed. by V.V. Kozlov et al. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 488 p.
7. Глухарев К.К., Улюков Н.М. К теории автомобильных потоков // Труды МФТИ. 2010. № 2. С. 58-66.
8. Глухарев К.К., Валуев А.М., Калинин И.Н., Улюков Н.М. О моделировании автомобильных потоков на магистральной сети // Труды МФТИ. 2013 Т. 5, № 4. С. 102-114.
9. Варайя П., Куржанский А.Б. Задачи динамики и управления в гибридных системах // Теория управления и теория обобщенных решений уравнений Гамильтона–Якоби. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2006. Т. 1. С.21-37.
10. Габасов Р., Кириллова Ф.М., Павленок Н.С. Оптимальное управление гибридной системой // Доклады АН. 2007. Т. 417, № 1. С. 34-40.
11. Branicky M.S, Borkar V.S., Mitter S.K. A unified framework for hybrid control: model and optimal control theory // IEEE Trans. Autom. Control. 1998. Vol. 43, No. 1. P. 31-45.
12. Yong J. Systems governed by ordinary differential equations with continuous, switching and impulse controls // Appl. Math. Optim. 1989. Vol. 20. P. 223–235.
13. Миллер Б.М., Рубинович Е.Я. Оптимизация динамических систем с импульсными управлениями. М.: Наука, 2005. 540 с.
14. Величенко В.В. О задачах оптимального управления для уравнений с разрывными правыми частями // Автоматика и телемеханика. 1966. № 7. С. 20-30.
15. Величенко В.В. Управление дискретно-непрерывными моделями катастроф // Доклады АН. 1996. Т. 350, №1. С. 9-11.
16. Valuev A.M. Control problem for event-switched processes // Acta Universitatis Apulensis. 2005. No. 10. P. 7–18.
17. Валуев А.М. Формализация и вариационный анализ класса гибридных систем, моделирующих переключаемые производственные процессы // Труды 4-й Межд. конф. по проблемам управления. Москва, 26–30 января 2009 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2009. С. 116-124.
18. Валуев А.М. Вычисление оптимальных маршрутов в сети с заданной динамикой ее загруженности для эволюционного решения задачи о равновесном рациональном распределении перевозок // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 06. С. 115-125.
19. Valuev A.M. Quasi-stationary Approach in Mathematical Modeling of Traffic Flows Dynamics in a City Road Network // Traffic and Granular Flow' 11. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 413-418.