

Концептуальная модель функционирования системы ВАДС как основа компьютерной имитации

Ерёмин В.М., к.т.н., профессор, профессор МГИУ (г. Москва),
генеральный директор ООО «ИНЭМДорТранс»



Рассматриваются основные признаки системы «водитель — автомобиль — дорога — окружающая среда» (ВАДС), а также существующие сложности в описании системы и её компонентов. Предлагается новый подход, основанный на методах имитационного моделирования, который не только позволяет описать элементы системы и принципы их взаимодействия, но и определить реакции любого элемента на изменение состояния системы.

В настоящее время уже прочно утвердился взгляд на процесс движения автомобилей как на функционирование сложной системы «водитель — автомобиль — дорога — окружающая среда» (ВАДС), который предполагает системный подход к исследованию безопасности дорожного движения, являющейся важнейшей характеристикой качества функционирования системы ВАДС.

На сегодняшний день не существует строгого математического определения понятия сложной системы. Обычно под сложной системой понимают собирательное название систем, состоящих из большого числа взаимосвязанных элементов; при этом приводятся типичные примеры таких систем с перечислением их типичных (но не формальных) признаков. Рассмотрим основные признаки системы ВАДС.

1. Многообразие влияющих факторов

Многочисленные наблюдения за системой ВАДС, проведённые как у нас в стране, так и в других странах, свидетельствуют о наличии широкого многообразия факторов, формирующих взаимодействие между элементами системы ВАДС. Десятки таких факторов уже выявлены по каждому элементу системы, причём влияние некоторых из них как в отдельности, так и в совокупности с другими, часто носит неоднозначный характер.

2. Стохастичность поведения

Случайности в поведении сложных систем обуславливаются двумя причинами. Во-первых, недостаточностью наших знаний о некоторых процессах, влияющих на поведение системы и проявляющихся в неожиданных изменениях её поведения. Такую неожиданность часто рассматривают как случайный фактор по соображениям удобства её описания. Система ВАДС содержит достаточно большое число такого рода неожиданностей, что также свидетельствует о её сложности. Во-вторых, случайность может носить объективный характер (по аналогии с принципом неопределённости в физике), особенно в процессах, определяющих поведение водителей в тех или иных ситуациях. Первые два признака, присущие системе ВАДС, если и не исключают полностью возможностей её продуктивного исследования только эмпирическими методами, то значительно их ограничивают. Причинами этого являются:

- отсутствие в достаточных количествах оборудования, способного фиксировать влияние одновременно многих существенных факторов;
- сложность и дороговизна в организации, проведении и обработке данных натурных наблюдений;
- получение выборок необходимой длины не зависит от наблюдателя из-за его пассивной роли, поэтому на их получение может потребоваться слишком много времени;
- проведение управляемых натурных экспериментов часто невозможно из-за опасностей, грозящих участникам таких экспериментов.

Все вышесказанное заставляет, по крайней мере, усомниться в действительности результатов, полученных на

основе данных о характеристиках функционирования системы ВАДС, и в правомочности их использования для оценки этих характеристик

3. Нестационарность системы ВАДС

Этот признак означает, что многие параметры, характеризующие функционирование отдельных элементов и системы в целом, зависят от времени. Это очевидное свойство системы ВАДС касается всех её элементов. Изменяются интенсивность и состав движения, погодные условия, характеристики дорожного покрытия, эмоциональное и функциональное состояние водителей, формы и методы подготовки и переподготовки водителей, схемы организации движения, правила дорожного движения и юридическое законодательство и т.д. Непосредственным следствием нестационарности является следующий существенный признак системы ВАДС.

4. Невоспроизводимость натурных экспериментов

Повышенная опасность проведения натурных экспериментов во многих случаях их просто исключает. В тех же случаях, когда это возможно (в частности, при наблюдении за системой), данный признак почти всегда исключает повторение реакции какого-нибудь элемента системы на одну и ту же ситуацию в различные моменты времени. Состояние системы ВАДС вследствие движения её элементов постоянно меняется, т.е. она все время как бы перестает быть сама собой.

Последние два признака системы ВАДС означают, что её продуктивное исследование только эмпирическими методами практически невозможно.

5. Многокритериальность.

Этот признак обуславливается разнообразием целей отдельных элементов системы ВАДС, а также разнообразием требований, предъявляемых к ней другими системами. Прежде всего, система ВАДС является активной системой, включающей в себя людей, имеющих свои собственные интересы и активно проводящих их в жизнь. Этим, в частности, объясняются многочисленные нарушения правил дорожного движения, проис-

ходящие на участках дорог с неудачной схемой организации движения. Данный признак особым образом проявляется также при проектировании и реконструкции дорог или схем организации движения. Требования, предъявляемые к новой дороге, часто носят противоречивый характер. Так, стремление повысить безопасность движения приводит к возрастанию капитальных затрат на строительство и эксплуатацию дороги, само строительство дороги противоречит требованиям охраны окружающей среды и т.д. Игнорирование данного признака при оценке проектных вариантов дорог или схем организации движения может привести (и часто приводит) к неудачным решениям и, в конечном счёте, к крупным материальным убыткам.

Итак, ограничиваться эмпирическими методами для продуктивного исследования системы ВАДС на современном этапе невозможно. Для этого необходимо привлекать иные методы — методы математического моделирования системы ВАДС.

Система ВАДС, являясь сложной, предполагает различные способы её формального математического описания. Так, с одной стороны, со сложной системой можно эффективно взаимодействовать несколькими методами различного рода, каждый из которых требует различного вида описания системы, а с другой стороны, для сложной системы трудно создать её адекватную модель. Этим, собственно, и объясняется имеющееся широкое многообразие математических моделей, описывающих те или иные характеристики функционирования системы ВАДС с различной степенью достоверности, но не пригодных для удовлетворительного её описания в целом.

В настоящее время построены удовлетворительные модели дороги и автомобиля как элементов ВАДС, имеются также удачные модели отдельных взаимодействий между автомобилем, дорогой и окружающей средой. Что же касается модели водителя, то здесь все основные работы по её созданию ещё впереди. Ранее автором было показано [1, 2, 3], что, даже имея удовлетворительные модели отдельных элементов системы ВАДС и их взаимодействий, невозможно пока построить аналитическую модель самой системы

ВАДС, удовлетворительно её описывающую. Это вынуждает прибегнуть к специфическим методам математического моделирования — методам имитационного моделирования, не подверженным никаким ограничениям, связанным с исследованием сложных систем.

Разработанные методы теории имитационного моделирования транспортных потоков [4, 5, 6] применимы также и к формальному описанию водителя. Эти методы позволяют строить семейство усложняющихся моделей водителя и его взаимодействий с другими элементами системы ВАДС; при этом такие модели имеют единообразное описание и в то же время не ограничивают возможности использования всех теоретических знаний о реальных процессах функционирования системы ВАДС, имеющихся на сегодняшний день. Аксиоматический подход, присущий данной теории, естественно сочетает в ней научный метод и системный подход, что придаёт ей основные черты фундаментальных наук.

Вкратце суть предлагаемого подхода можно представить следующим образом.

На основе априорной и эмпирической информации строится микроописание системы ВАДС (имитационная модель системы), т.е. набор моделей поведения отдельных элементов системы, механизмов их взаимодействия между собой и их реакций на поступающие извне сигналы. Затем с заданным микроописанием (имитационной моделью) проводятся серии компьютерных экспериментов, на основании которых и строятся макротехники исследуемой системы. Таким образом, макротехники системы являются, по существу, следствием её исходного микроописания.

Моделируемая реальная система ВАДС представляет собой открытую динамическую систему, состоящую из конечного числа элементов (автомобилей), движущихся в некоторой заданной области организованной сети, схема организации движения и т.д.). Извне в систему могут поступать входные сигналы (в частности, новые автомобили, управляющие сигналы). Время поступления и вид поступающих в систему входных сигналов подчиняются определённым

(обычно, вероятностным) законам (законы влияния внешнего мира).

Каждый элемент характеризуется конечным набором атрибутов, которые изменяются во времени. Так, автомобиль в каждый момент времени описывается следующими параметрами: положением на дороге (координаты определённых точек), курсовой угол, линейная скорость, ускорение (замедление), скорость и направление поворота рулевого колеса, номер передачи коробки перемены передач и др. Другими словами, каждый элемент представим в виде вектора конечной длины, каждая компонента которого может изменяться в заданных пределах. Совокупность возможных значений вектора, характеризующего данный элемент, определяет пространство состояний данного элемента. Пространство состояний системы в целом в данный момент времени есть прямое произведение пространств состояний находящихся в системе элементов.

В качестве основной рабочей гипотезы при разработке микроописания ВАДС принята следующая: в процессе функционирования системы функция изменения любого параметра любого элемента изменяется скачкообразно в дискретные моменты времени и остаётся непрерывной в промежутках между скачками. Суть данной гипотезы заключается в том, что скачкообразное изменение параметров системы не является спонтанным, а обусловлено определённой причиной. Поэтому системное микроописание ВАДС должно давать ответы на два типа вопросов:

1. Что именно является причиной скачка функции параметра?

2. Что представляет собой скачок и как ведут себя функции параметров после скачка, если известна предыстория процесса?

Ответ на первый вопрос дескриптивно представляет собой перечень особых ситуаций, возникающих в процессе движения, которые вынуждают водителей изменять режим движения своих автомобилей. В разработанные модели включено большинство таких ситуаций, которые встречаются в реальном процессе движения. Все особые ситуации поделены на три категории.

К первой категории относятся ситуации, определяющие условия и ха-

рактер взаимодействия элементов с окружающей средой (включая дорогу и придорожное пространство). Примеры такого рода ситуаций:

■ автомобиль достиг участка дороги, на котором меняются геометрические параметры;

■ автомобиль достиг участка дороги, на котором меняется схема организации движения, и т.д.

Ко второй категории относятся ситуации, определяющие условия и характер взаимодействия автомобилей между собой. Примеры таких ситуаций:

■ автомобиль догнал впереди идущий автомобиль по своей полосе движения;

■ автомобиль приблизился к впереди идущему автомобилю на опасное расстояние и т.д.

К третьей категории относятся ситуации, определяющие характер влияния входных сигналов. Примеры таких ситуаций:

■ на входе рассматриваемого участка дороги появился новый автомобиль;

■ на заданном участке моделируемой дороги изменились показания светофора и т.д.

Формально особые ситуации или (что то же самое) причины, вызывающие скачки функции какого-либо параметра, можно представить в виде некоторого уравнения:

$$F(z_1, z_2, \dots, z_n) = 0,$$

где z_1, z_2, \dots, z_n — компоненты вектора состояния системы.

Особым ситуациям соответствуют различные уравнения, определяющие набор гиперповерхностей в пространстве состояний системы.

Итак, пространство состояний системы поделено на области набором гиперповерхностей трёх категорий. Гиперповерхности первой категории определяют условия и характер взаимодействия элементов с окружающей средой (включая дорогу и придорожное пространство), гиперповерхности второй категории определяют условия и характер взаимодействия элементов системы между собой, гиперповерхности третьей категории определяют характер влияния входных сигналов на элементы системы.

Ответ на второй вопрос представляет собой перечень алгоритмов вычисления скачков, соответствующих наступлению каждой особой ситуации. Грубо говоря, скачок пред-

ставляет собой реакцию водителя на наступившую особую ситуацию, которая реализуется водителем через органы управления автомобилем следующими способами: нажатием на педаль тормоза или акселератора; изменением передаточного числа коробки перемены передач; вращением рулевого колеса. Рассмотрим пример (в упрощённом виде) определения скачка для одной из особых ситуаций.

Пусть водитель одиночного автомобиля, движущегося с некоторой постоянной скоростью, выезжает на участок со знаком ограничения скорости движения. Если скорость автомобиля меньше ограничения, то изменение режима движения не происходит (нулевой скачок). Иначе, если водитель недисциплинирован и не собирается выполнять требования знака, то изменения режима не происходит. В противном случае водитель придаёт автомобилю замедление (скачок параметра «ускорение автомобиля»), значение которого зависит от разности скорости автомобиля и ограничения скорости, состояния покрытия, типа автомобиля и водителя и т.д. При этом влияние указанных факторов на выбор замедления носит случайный характер с заданными законами распределения.

Такого рода алгоритмы вычисления скачков в формализованном виде определены для каждой особой ситуации. При этом для описания многих из них требуются десятки операторов алгоритмического языка высокого уровня.

Итак, формальное функционирование имитационной модели ВАДС происходит следующим образом. Пусть в начальный момент времени состояние системы задано и не лежит ни на одной из гиперповерхностей (впрочем, это не принципиально). Движение вектора системы в пространстве состояний будет происходить по заданным законам движения до тех пор, пока он не достигнет одной из заданных гиперповерхностей. Функции, определяющие изменения компонент вектора каждого элемента (законы движения), являются решениями заданных дифференциальных уравнений, определяемых теорией движения автотранспортных средств.

В момент достижения гиперповерхности в состоянии системы происходит скачок, определяемый некоторым заданным вероятностным законом (закон отражения). После этого состояние системы вновь изменяется по заданным законам движения до тех пор, пока не достигнет очередной гиперповерхности, после чего опять происходит скачок и т.д.

Задание конкретных законов движения и отражения, законов влияния внешнего мира и конкретных гиперповерхностей, зависит от конкретной моделируемой ВАДС. Отметим, что при использовании данного подхода к моделированию определены реакции любого элемента системы на изменение состояния системы для всех её возможных состояний. Применённый к математическому описанию ВАДС подход в последнее время стал называться динамической системой с джокером.

Варьируемыми факторами в разработанных имитационных моделях являются следующие:

- дорожные факторы (геометрические параметры продольного и поперечного профилей дороги, тип пересечения дорог, геометрические характеристики пересечения, характеристики дорожного покрытия, расстояние видимости и др.);

- схема организации дорожного движения (наличие различных дорожных знаков, дорожной разметки, светофоров и др.);

- параметры транспортного потока (интенсивность движения, состав транспортного потока);

- характеристики отдельных автомобилей в составе транспортного потока (тип и марка автомобиля, параметры двигателя и трансмиссии, габаритные и весовые параметры, возраст автомобиля, коэффициенты обтекаемости, сопротивления качению шин и др.);

- 5) характеристики водителей (тип водителя: осторожный, нормальный, агрессивный, время реакции водителя по отношению к соблюдению тех или иных правил дорожного движения, желаемая скорость и др.).

Данный подход был успешно апробирован при моделировании функционирования разнообразных вариантов системы ВАДС [7, 8]. ■

Литература:

1. Ерёмин В.М. Теория имитационного моделирования транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения // Повышение транспортных качеств автомобильных дорог и безопасности движения: Сб. науч. трудов. М.: МАДИ, 1986. С. 3–14.
2. Ерёмин В.М. Принципы построения имитационных моделей движения транспортных потоков // Применение ЭВМ в проектировании автомобильных дорог: Труды Союздорнии. М., 1988. С. 36–41.
3. Ерёмин В.М. Методологические аспекты исследования системы «водитель — автомобиль — дорога — окружающая среда» // Актуальные вопросы повышения безопасности движения: Сб. науч. трудов. М.: МАДИ, 1988. С. 4–8.
4. Ерёмин В.М. Имитационное моделирование сложных систем // НТИ. Серия 2. 1999. № 6, С. 13–17.
5. Бадалян А.М., Ерёмин В.М. Компьютерное моделирование конфликтных ситуаций для оценки уровня безопасности движения на двухполосных автомобильных дорогах. М.: ИКФ «Каталог», 2007. 240 с.
6. Бадалян А.М., Ерёмин В.М. Общие положения о компьютерной имитации транспортных потоков // Безопасность дорожного движения. Справочная энциклопедия дорожника (СЭД). Том VII / Под ред. д.т.н., проф. В.В.Сильянова. М.: ФГУП «ИНФОРМАВТОДОР», 2009. С. 142–144.
7. Ерёмин В.М., Бадалян А.М. Компьютерное моделирование работы автотранспортных городских сетей для оценки и выбора вариантов их развития и управления // Международный семинар «Перегруженность транспортных сетей мегаполисов: проблемы и пути решения», Москва, 9–10 июля 2007 года. / Материалы семинара. М.: НИИАТ, 2007, С. 91–106.
8. Ерёмин В.М., Бадалян А.М. ОДМ 218.6.011–2013 «Методика оценки влияния дорожных условий на аварийность на автомобильных дорогах федерального значения для планирования мероприятий по повышению безопасности дорожного движения», 2013. М.: РОСАВТОДОР. 58 с.