

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОПОЛОСНОГО ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА БЕСПИЛОТНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ СЛЕДОВАНИЯ ЗА ЛИДЕРОМ

КУВЕРИН Игорь Юрьевич, канд. техн. наук, доцент; e-mail: igorkuv@mail.ru

ГУСЕВ Сергей Александрович, д-р экон. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: o051nm@yandex.ru

ЗЕРНОВ Александр Анатольевич, аспирант; e-mail: inform2@rusptk.com

БЛИНОВ Дмитрий Геннадьевич, аспирант; e-mail: bdg@rusptk.com

Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина, кафедра «Организация перевозок, безопасность движения и сервис автомобилей», Саратов

Исследуются особенности моделирования движения беспилотных автотранспортных средств и разрабатываются подходы к моделированию их потока с учетом перспективных решений на основе задания алгоритмов поведения транспортного средства для обеспечения целевых показателей транспортного процесса. Предложены факторы, учитывающие особенности моделирования беспилотных автотранспортных средств: приоритет для определенных категорий транспортных средств, создание обособленных парковок, динамическая пересадка с одного маршрутного транспортного средства на другое на ходу, динамическая зарядка или заправка, динамическая перегрузка грузов, многоярусные транспортные средства, многозвенные автопоезда без физической связи отдельных звеньев, высокоскоростное движение транспортных средств в условиях высокой плотности потока. Также на конкретном примере разработки макромоделей движения беспилотных автотранспортных средств в условиях высокой плотности потока показаны особенности моделирования их движения, заключающиеся в первоначальном задании алгоритмов поведения автономного транспортного средства, на основе которых в дальнейшем уже и строится модель транспортного потока.

Ключевые слова: беспилотные автотранспортные средства, моделирование транспортного потока, теория колебаний, теория управления, физическая интерпретация, транспортная сеть, цифровой двойник, автомобильная редукция, микромодель, макромодель.

DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-166-177

▼ Введение

Проектирование и оптимизацию движения автомобильного транспорта проводят с помощью некоторых обобщенных моделей движения автотранспортных средств, где движение отдельных автомобилей представляют в виде транспортного потока, который обладает набором определенных характеристик.

В настоящее время большое количество научных работ посвящено разработке и совершенствованию данного вида моделей. Так, работа [1] посвящена сложности моделирования смешанного транспортного потока, в котором присутствуют автономные транспортные средства с автопилотами и автомобили с водителями-людьми. Работа [2] посвящена моделированию транспортных потоков на перекрестке повышенной сложности и движения. В работе [3] производится выбор оптимального метода моделирования,

оптимизации, принятия решений. В работе [4] проводится попытка учета влияния времени реакции водителей на характеристики транспортного потока. В работе [5] рассматривается расчет транспортного потока с использованием данных современных интеллектуальных транспортных систем с учетом пропусков данных, вызванных отказом детекторов или влиянием внешней среды (например, уровнем сигнала). Работа [6] направлена на учет при расчете транспортных потоков изменения дорожной ситуации в виде препятствий, кривизны, количества полос движения, ограничения скорости и других факторов. В статье [7] выражены соотношения типа Беллмана для условно оптимального выбора маршрута, которые могут быть объединены с уравнениями общего баланса, выражающими квазистационарный подход, который дает замкнутую прогностическую модель. В статье [8] рассматриваются

особенности моделирования транспортного потока на трех уровнях:

- уровень I — действия, ограниченные местным уровнем, на уровне жилых домов с низкой интенсивностью движения и возможностями для ограничения скорости движения и уменьшения воздействия на дорожное движение;
- уровень II — действия, распространяющиеся на коридор, которые влияют на трафик в этом коридоре, но не на сеть;
- уровень III — действия на макроуровне, распространяющиеся на большую территорию и оказывающие влияние на сеть трафика.

Анализ указанных публикаций показывает, что при создании моделей транспортного потока стоит целый комплекс взаимосвязанных и зачастую противоречивых требований. Одно из основных требований состоит в адекватности модели реальному поведению транспортных средств [9]. Однако на процесс движения транспортного средства оказывает влияние значительное количество различных факторов:

1. Состояние транспортного средства: исправность двигателя, трансмиссии, ходовой части, рулевого управления, тормозной системы и других узлов и агрегатов [10].
2. Состояние дороги: тип дорожного покрытия, наличие неровностей, выбоин и других дефектов, ширина и состояние обочин, наличие дорожных знаков и разметки.
3. Погодные условия: температура воздуха, наличие осадков, сила и направление ветра, видимость.
4. Водитель: его квалификация, опыт, состояние здоровья и уровень внимания, соблюдение им правил дорожного движения.
5. Пассажиры и груз: их количество, расположение и вес.
6. Другие участники дорожного движения: автомобили, мотоциклы, велосипеды, пешеходы и т. д.

Кроме того, на процесс движения транспортного средства могут влиять и другие факторы, такие как:

1. Особенности конструкции транспортного средства (например, наличие или отсутствие полного привода, тип подвески и т. д.) [11].
2. Наличие или отсутствие специального оборудования (например, антиблокировочной системы тормозов, системы курсовой устойчивости и т. д.).
3. Состояние окружающей среды (например, наличие пыли, дыма или тумана в воздухе).
4. Время суток (например, в ночное время видимость хуже, что может привести к увеличению вероятности ДТП).

Все эти факторы могут влиять на скорость движения транспортного средства, его управляемость и безопасность [12]. Водитель должен учитывать их при управлении автомобилем и принимать соответствующие меры для обеспечения безопасности движения.

Поэтому попытки создания и совершенствования моделей поведения транспортных средств в потоке носят непрерывный характер.

Основная проблематика исследуемого вопроса состоит в следующем:

- модели транспортного потока с небольшим количеством параметров обладают ограниченной способностью описывать реальное поведение транспортных средств из-за недостаточного учета влияния различных факторов;
- модели транспортного потока со сложной структурой и большим количеством параметров трудно применимы на практике из-за затруднительности определения значений этих параметров в реальных условиях эксплуатации.

Таким образом, существует противоречие между необходимостью учитывать большое количество факторов для адекватного описания поведения транспортного потока и возможностью практического использования моделей транспортного потока с большим количеством параметров [13, 14]. Это является одной из основных проблем в области моделирования транспортного потока.

Однако наметившаяся в последнее время тенденция в области создания БАС неизбежно приведет к устранению человека от управления транспортными средствами и созданию

цифровой системы организации транспортного процесса на основе цифровых двойников и предиктивной аналитики [15–17]. При этом, по мнению авторов, произойдет переход от описания, моделирования и прогнозирования транспортного процесса к его проектированию и построению на принципиально новых моделях и подходах. В ходе решения проблемы построения беспилотной автотранспортной системы возникают совершенно новые проблемы и задачи [18]. Данная статья посвящена разработке методологии построения моделей транспортного потока беспилотных автотранспортных средств (БАС).

Материалы и методы

Прежде всего необходимо выделить две основные задачи, для решения которых может быть использована предлагаемая в данной статье методология создания беспилотной автотранспортной системы:

1. Проектирование беспилотной автотранспортной системы. В ходе решения этой задачи происходит построение транспортной сети, наполнение ее возможными вариантами БАС, задание режимов движения и т. д.
2. Оперативное управление созданной транспортной сетью для организации и управления автотранспортными потоками в режиме реального времени.

Решение первой и второй задач кардинально различается.

Для решения первой задачи необходимо создание на основе анализа существующих моделей транспортного потока новых моделей с учетом принципиально новых возможностей. Одна из таких возможностей состоит в описании не каких-то усредненных показателей работы автомобилей, а введения в модели реальных показателей перспективных БАС и возможных параметров реальных дорожных условий. Также одним из принципиальных отличий таких моделей является не прогнозирование поведения водителя транспортного средства, а задание алгоритмов поведения БАС для обеспечения целевых показателей транспортного процесса. При этом возникает возможность реализации ряда принципиально новых перспективных решений, которые от-

сутствуют в настоящее время, но также должны быть учтены. Выделим некоторые из них:

- задание приоритета для определенных категорий БАС. Реализация данного решения позволяет пропускать автомобили скорой помощи, оперативных служб (полиция, МЧС, охранные и другие структуры) в режиме повышенного скоростного режима. Также становится возможным создавать виртуальные полосы движения общественного транспорта, по которым двигались бы и другие транспортные средства, однако при движении общественного транспорта ему бы уступали дорогу [19]. Кроме того, в рамках реализации данной концепции возможна покупка уровня приоритета за дополнительную плату;
- создание обособленных парковок. Так как для движения беспилотного транспорта не требуется наличие водителя, автомобиль может доставить пассажиров до места назначения, и затем транспортное средство самостоятельно, без людей переместилось бы до парковочного места и самостоятельно встало на стоянку. При этом существенно расширяется удобство использования при реализации различных вариантов исполнения мест парковки (наземные, подземные, загородные, многоярусные, с зарядными станциями для электромобилей);
- динамическая пересадка с одного маршрутного транспортного средства на другой на ходу;
- динамическая зарядка или заправка самостоятельно движущейся и стыкующей на ходу с автомобилем зарядной или заправочной станцией по аналогии с заправкой самолетов в воздухе;
- динамическая перегрузка грузов с одного БАС на другой;
- многоярусные транспортные средства;
- многозвенные автопоезда без физической связи отдельных звеньев;
- высокоскоростное движение БАС в условиях высокой плотности потока.

На начальном этапе необходима проработка подходов к созданию моделей потока БАС. В основу модели положим концепцию построения классических моделей транспортного

потока, основанных на теории следования за лидером с учетом особенностей движения беспилотного транспорта. При этом первоначальной точкой будет не математическое описание существующего транспортного процесса, а задание механизма относительного движения БАС и только затем его дальнейшее математическое описание. Также при математическом описании необходимо учитывать наличие переходного периода от автономных беспилотных автотранспортных средств до полностью беспилотной среды, в которой решения в области движения автотранспорта будут приниматься не отдельными автомобилями, а единой информационной системой на основе цифрового двойника всей транспортной инфраструктуры.

В качестве примера рассмотрим однополосное движение БАС. Примем, что управление движением БАС будет задаваться электронными системами БАС по расстоянию между автомобилями. В этом состоит принципиальное отличие в моделировании БАС по сравнению с моделированием традиционных автомобилей, так как мы задаем алгоритм поведения БАС, на основе которого строится построение модели потока. В данном случае при таком подходе до определенного критического значения скорости движение БАС можно рассматривать как автопоезд на гибкой сцепке.

Известно, что при больших значениях плотности потока поток становится неустойчивым. Поэтому особую важность представляют вопросы динамической устойчивости системы. При появлении любых возмущающих явлений, выводящих систему из состояния равновесия

(изменение уклона дороги красный сигнал светофора и др.), возможно появление волновых процессов, которые приведут к периодическим явлениям разгона и торможения транспортных средств. Для выявления характеристик этих волновых процессов необходимо построение математической модели изменения плотности автотранспортного потока.

Модель транспортных потоков

На рис. 1 показано движение отдельных БАС по полосе движения. Примем модель следования БАС за вперед идущим транспортном по аналогии с законом Гука: чем дальше расстояние от заданного, тем, соответственно, большая сила воздействует на автомобиль (тормозная или сила тяги), стремящаяся вернуть заданное расстояние.

Воспользуемся приемом, который называют автомодельной редукцией¹, и перейдем от микромоделю к макромоделю. Представим транспортный поток состоящим из множества одинаковых шариков (известной массы), соединенных одинаковыми пружинками (известной длины и жесткости), имеющими нулевую массу (рис. 2).

Поведение каждого шарика описывается вторым законом Ньютона (для отклонения шарика от положения равновесия) и зависит (посредством закона Гука) только от положений соседних шариков. Таким образом, с помощью предельного перехода (шарики выбираются все меньше и меньше, пружинки, соединяющие шарики, становятся все меньше и меньше) от шариков и пружин переходим к продольным колебаниям стержня (рис. 3).

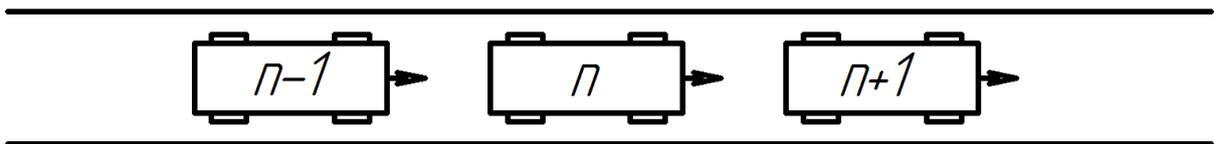


Рис. 1. Микроскопическая модель транспортного потока

¹ Автомодельная редукция — это математический метод, используемый для уменьшения размерности сложных моделей путем идентификации и сохранения наиболее важных характеристик. Автомодельная редукция работает путем разбиения вычислительной области на более мелкие поддомены, называемые ячейками.



Рис. 2. Автомодельная редукция транспортного потока

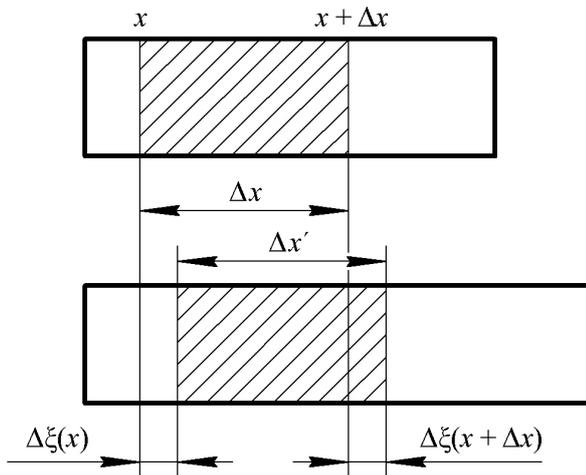


Рис. 3. Продольные колебания тонкого, абсолютно упругого стержня

Выведем уравнение продольных колебаний в тонком, абсолютно упругом стержне [20, 21]. Элементарный отрезок стержня Δx , ограниченный плоскостями x и $x + \Delta x$, растягивается под действием силы на величину $\Delta \xi = \xi(x + \Delta x) - \xi(x) = \Delta x' - \Delta x$ (см. рис. 3).

Относительное удлинение элемента стержня (продольная деформация) есть: ξ

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\xi(x + \Delta x) - \xi(x)}{\Delta x}, \quad (1)$$

Согласно закону Гука, напряжение, возникающее в стержне, равно:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга, коэффициент, характеризующий упругие свойства материала (в нашем случае коэффициент пропорциональности между расстоянием до заданной дистанции между автомобилями и величиной управляющего воздействия увеличением тяговой или тормозной силы).

Запишем второй закон Ньютона для элемента стержня:

$$\rho S \Delta x \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = S \sigma(x + \Delta x) - S \sigma(x), \quad (3)$$

где ρ — плотность (в нашем случае плотность массы БАС на участке дороги);

S — площадь поперечного сечения.

Поделив обе части уравнения (3) на $S \Delta x$ и устремив Δx к 0, а также учитывая, что, согласно (2)

$$\sigma = E \frac{\partial \xi}{\partial x}, \text{ получим:}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

Соотношение (4) — волновое уравнение. Его решение представляется в виде волн $(x, t) = f(x \pm ct)$, или их суперпозиции:

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — скорость распространения этих волн.

Для наглядности данную задачу можно представить в виде тождественной с точки зрения математики задачи колебаний струны.

Рассмотрим частный случай, в рамках которого уравнение колебаний получается сравнительно легко решить, а именно задачу о колебаниях бесконечной струны.

Если длина струны достаточно велика, то влиянием концов струны на колебания, возникающие в ее средней части, можно пренебречь. Следует отметить, что в процессе колебаний по струне влево и вправо бегут волны, которые, дойдя до концов, отражаются. Таким образом, если мы не учитываем влияние концов струны, то и влияние отраженных волн мы также не учитываем, что соответствует поставленной задаче моделирования транспортного потока.

Будем рассматривать свободные колебания. Тогда задача будет выглядеть следующим образом: решить уравнение

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2},$$

при начальных условиях

$$\begin{aligned} \xi|_{t=0} &= f(x), \\ \frac{\partial \xi}{\partial t}|_{t=0} &= F(x), \end{aligned} \quad (5)$$

где функции $f(x)$ и $F(x)$ заданы на всей числовой оси. Отметим отсутствие в этой задаче краевых условий для $u(x, t)$. Мы и не можем их поставить, так как струна считается бесконечной. Очевидно, задача (4), (5) является задачей Коши [21]. Будем решать ее методом Даламбера [22, 23], который называется также методом бегущих волн. Покажем, что уравнению (4) удовлетворяет функция

$$(x, t) = \varphi(x - ct) + \psi(x + ct), \quad (6)$$

где φ и ψ предполагаются дважды дифференцируемыми. Для этого нужно подставить эту функцию в уравнение (4) и убедиться, что получится тождество. Найдем предварительно соответствующие производные:

$$\begin{aligned} \xi'_x &= \varphi'(x - ct) + \psi'(x + ct); \\ \xi''_{xx} &= \varphi''(x - ct) + \psi''(x + ct); \\ \xi'_t &= -c\varphi'(x - ct) + c\psi'(x + ct); \\ \xi''_{tt} &= c^2\varphi''(x - ct) + c^2\psi''(x + ct). \end{aligned}$$

Тогда после подстановки в (4) получаем тождество:

$$\begin{aligned} c^2\varphi''(x - ct) + c^2\psi''(x + ct) &\equiv \\ &\equiv c^2(\varphi''(x - ct) + \psi''(x + ct)). \end{aligned}$$

Теперь, когда мы знаем общее решение уравнения (4), необходимо определить неизвестные функции φ и ψ . Воспользуемся для этого начальными условиями. Пусть $t = 0$. Тогда

$$\begin{aligned} \xi(x, 0) &= \varphi(x) + \psi(x); \\ \xi'_t(x, 0) &= -c\varphi'(x) + c\psi'(x). \end{aligned}$$

Первое из условий (5), таким образом, даст нам выражение

$$\varphi(x) + \psi(x) = f(x),$$

а второе — выражение

$$-c\varphi'(x) + c\psi'(x) = F(x),$$

Проинтегрируем последнее равенство в пределах от 0 до x :

$$-c[\varphi(x) - \varphi(0)] + c[\psi(x) - \psi(0)] = \int_0^x F(x) dx,$$

или

$$-\varphi(x) + \psi(x) = \frac{1}{c} \int_0^x F(x) dx + C,$$

где

$$C = -\varphi(x) + \psi(x).$$

Таким образом, для определения функций φ и ψ мы имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} -\varphi(x) + \psi(x) &= f(x); \\ -\varphi(x) + \psi(x) &= \frac{1}{c} \int_0^x F(x) dx + C, \end{aligned}$$

решая которую, получим

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{1}{2} f(x) - \frac{1}{2c} \int_0^x F(x) dx - \frac{C}{2}, \\ \psi(x) &= \frac{1}{2} f(x) + \frac{1}{2c} \int_0^x F(x) dx - \frac{C}{2}. \end{aligned}$$

Заменим в этих формулах аргумент x соответственно на $x - ct$ и $x + ct$ и подставим полученные таким образом функции в решение (6):

$$\begin{aligned} \xi(x, t) &= \frac{1}{2} f(x - ct) - \frac{1}{2c} \int_0^{x-ct} F(x) dx + \\ &+ \frac{1}{2} f(x + ct) + \frac{1}{2c} \int_0^{x+ct} F(x) dx. \end{aligned}$$

При этом справедливо равенство

$$\begin{aligned} -\int_0^{x-ct} F(x) dx + \int_0^{x-ct} F(x) dx &= \int_{x-ct}^0 F(x) dx + \\ + \int_0^{x+ct} F(x) dx &= \int_{x-ct}^{x+ct} F(x) dx. \end{aligned}$$

Используя которое окончательно получим

$$\xi(x, t) = \frac{f(x-ct) + f(x+ct)}{2} + \frac{1}{2c} \int_{x-ct}^{x+ct} F(x) dx. \quad (7)$$

Проверим, что функция (7) действительно удовлетворяет уравнению (4) и условиям (5). Для этого прежде всего напомним формулу дифференцирования интеграла с переменным верхним пределом:

$$\frac{d \int_c^x f(t) dt}{dx} = f(x).$$

Отметим также, что в нашем случае переменный предел является сложной функцией. Тогда

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{x+ct} F(x) dx = F(x+ct);$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{x-ct} F(x) dx = F(x-ct);$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{x+ct} F(x) dx = cF(x+ct);$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \int_0^{x-ct} F(x) dx = -cF(x-ct).$$

Представим функцию (7) в виде

$$\xi(x, t) = \frac{f(x-ct) + f(x+ct)}{2} - \frac{1}{2c} \int_0^{x-ct} F(x) dx + \frac{1}{2c} \int_0^{x+ct} F(x) dx$$

И дважды продифференцируем ее по x и по t :

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{f'(x-ct) + f'(x+ct)}{2} + \frac{F(x+ct) + F(x-ct)}{2c};$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{-cf''(x-ct) + cf''(x+ct)}{2} + \frac{F'(x+ct) + F'(x-ct)}{2};$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{f''(x-ct) + f''(x+ct)}{2} + \frac{F'(x+ct) + F'(x-ct)}{2c};$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{c^2(f''(x-ct) + f''(x+ct))}{2} + \frac{c(F'(x+ct) + F'(x-ct))}{2}.$$

Подставив эти производные в уравнение (4), получим тождество.

Положим теперь $t = 0$ и убедимся, что функция (7) удовлетворяет

$$\xi|_{t=0} = \frac{f(x) + f(x)}{2} + \frac{1}{2c} \int_x^x F(x) dx = f(x);$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} \Big|_{t=0} = \frac{-cf'(x) + cf'(x)}{2} + \frac{1}{2} F(x) + \frac{1}{2} F(x) = F(x).$$

Формула (7) называется решением Даламбера задачи Коши для уравнения колебаний струны. Как можно видеть из этой формулы, для получения решения задачи (4), (5) методом Даламбера фактически необходимо только знание функций из начальных условий (5) и коэффициента из уравнения (4).

Результаты

Рассмотрим физическую интерпретацию уравнения (7). Пусть наблюдатель, находившийся в начальный момент времени $t = 0$ в точке $x = 0$, движется со скоростью c в положительном направлении. Введем систему координат, связанную с наблюдателем:

$$\begin{aligned} x^* &= x - ct, \\ t^* &= t \end{aligned}$$

и рассмотрим функцию $\xi(x, t) = \varphi(x - ct)$. Тогда справедливы выражения:

$$\begin{aligned} \xi &= \varphi(x^*), \\ x &= x^* + ct. \end{aligned}$$

Таким образом, наблюдатель будет видеть тот же профиль струны, что и в начальный момент времени, а сама функция $(x - ct)$ представляет неизменный профиль, перемещающийся по мере возрастания t вправо (в положительном направлении оси x) со скоростью c (рис. 4).

Аналогично показывается, что функция $(x + ct)$ представляет собой профиль, перемещающийся влево со скоростью c .

Процесс перемещения отклонения по струне называется волной.

Коэффициент

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

называется скоростью распространения волны [24, 25].

В качестве примера распространения волн можно рассмотреть формирование синусоидальных волн. В реальности форма волн будет зависеть от формы возмущающего воздействия. Если скорость распространения такой волны равна c , а точка, совпадающая с началом координат, колеблется по закону

$$\xi = A \sin \omega t,$$

то отклонение дается формулой:

$$\xi(x, t) = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c} \right).$$

Перепишем эту функцию в следующем виде:

$$\xi(x, t) = A \sin \frac{\omega}{c} (ct - x).$$

Отсюда видно, что в правой части этого выражения стоит функция, зависящая от аргумента $(ct - x)$, или, что эквивалентно, от аргумента $(x - ct)$.

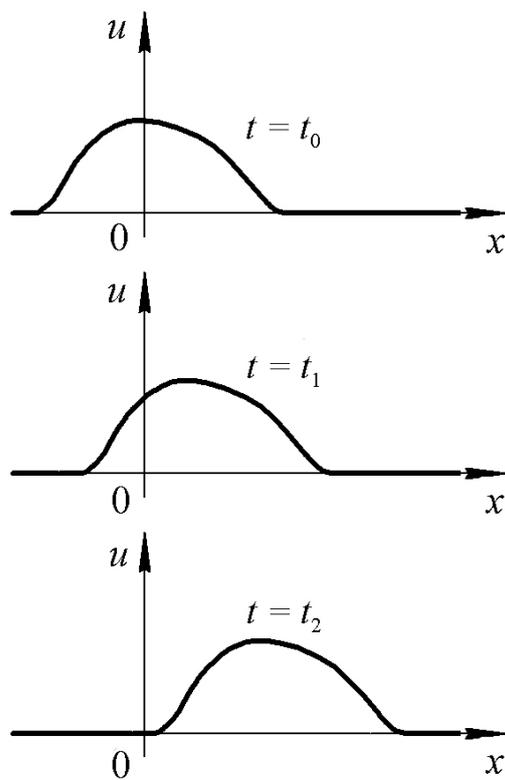


Рис. 4. Перемещение отклонения в разные моменты времени в виде волны

Заключение

Традиционные модели транспортного потока не учитывают ряд факторов, которые становятся актуальными в условиях движения БАС.

Для моделирования движения БАС необходимы принципиально новые подходы, учитывающие принципы построения и функционирования беспилотного транспорта.

В качестве примера механизма учета выявленных факторов для движения БАС в услови-

ях высокой плотности транспортного потока построена макромодель.

В основу данной модели положено решение задачи о свободных колебаниях бесконечной струны по методу Даламбера. Она может быть использована для проектирования и управления транспортными системами как автономного, так и беспилотного транспорта в условиях неразрывности потока.

Основным ограничением исследования является то, что разработанная модель транспортного потока БАС является теоретической и не была проверена на практике. Для подтверждения достоверности полученных результатов необходимо провести экспериментальные исследования.

Также необходимо отметить, что в приведенной модели задан линейный закон между управляющим воздействием (тормозной силой или силой тяги) и заданным расстоянием между автомобилями. При этом безопасность движения при поломках в системах транспортных средств, появлении внезапных препятствий и т. п. может быть обеспечена либо учетом необходимой дистанции между БАС с учетом фактического торможения в рамках данной модели, либо введением режима экстренного торможения.

Кроме того, приведенная модель основана на некоторых допущениях, что несколько ограничивает ее применимость:

- рассматривается движение в условиях высокой плотности потока, что обусловлено необходимостью неразрывности потока;
- движение транспорта однополосное;
- на дороге присутствуют только автономные транспортные средства;
- принят линейный характер между расстоянием между автомобилями и управляющей силой (по факту может быть задана любая необходимая функция).

Разработанные подходы к учету различных факторов при построении моделей транспортного потока БАС являются перспективным инструментом для исследования и проектирования транспортных систем. Расчет поведения БАС по разработанной модели позволит определять с учетом реальных технических характеристик беспилотных транспортных

средств оптимальное значение величины E (формула 2) — коэффициента пропорциональности между расстоянием до заданной дистанции между автомобилями и величиной управляющего воздействия увеличением тяговой или тормозной силы, а также оптимальных расстояний между автомобилями с учетом безопасности перевозочного процесса.

Таким образом, разработанная модель может быть использована применительно к конкретной транспортной сети для решения двух задач:

1. Проектирования беспилотной транспортной системы в условиях высокой плотности потока.
2. Оперативного управления транспортной сетью для организации и управления транспортными потоками беспилотной автотранспортной системы в условиях высокой плотности потока в режиме реального времени.

В разработанной модели показателями, характеризующими движение транспорта, являются:

- скорость распространения волн изменения плотности массы автомобилей;
- плотность массы автомобилей на участке дороги.

Соответственно, плотность транспортного потока будет равна:

$$\rho_{\text{пот}} = \frac{\rho}{m_{\text{авт}}},$$

где $\rho_{\text{пот}}$ — плотность транспортного потока;
 $m_{\text{авт}}$ — средняя масса автомобиля на заданном участке дороги.

Также можно отметить, что на дорогах могут появляться пробки, причем иногда даже в том случае, когда для этого нет видимых причин: аварий, дорожных работ, слияния полос и т. д. Когда движение на свободном участке все равно замедляется, специалисты называют это фантомной пробкой. Феномен обусловлен плотностью транспортного потока: если она слишком велика, автомобили просто не могут трогаться и останавливаться одновременно [26]. В таком случае даже небольшая «зачинка» (например, водитель слишком резко затормозил, тем самым нарушив скоростной режим) может создать волну плотности, кото-

рая распространится на едущие позади автомобили и парализует движение на некоторых участках пути. При этом, как только пробка образовалась, с ней уже ничего нельзя сделать, поэтому борьба с фантомными пробками заключается в поиске способов предотвратить их возникновение. Выражение 7, как видно из приведенной в статье его физической интерпретации (рис. 4), описывает формирование и распространение таких волн плотности.

Таким образом, прогнозирование параметров изменения плотности потока с помощью разработанной модели может помочь предотвратить образование фантомных пробок и обеспечить более плавное и эффективное движение на дорогах.

Основные направления дальнейших исследований в данной области:

1. Экспериментальная проверка разработанной модели транспортного потока беспилотных транспортных средств в условиях высокой плотности потока.
2. Дальнейшее развитие методов и алгоритмов управления транспортным потоком беспилотных транспортных средств.
3. Исследование влияния различных факторов на движение транспортного потока беспилотных транспортных средств.
4. Разработка новых моделей транспортного потока беспилотных транспортных средств, учитывающих различные аспекты их движения.
5. Построение системы беспилотного транспорта на основе цифровых двойников. ▲

Библиографический список

1. Бобровская О. П. Проблемы моделирования смешанного транспортного потока / О. П. Бобровская, Т. В. Гавриленко // Успехи кибернетики. 2023. Т. 4, № 3. С. 39–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-04. EDN ZQPFZJ.
2. Шамлицкий Я. И. Моделирование транспортных потоков средствами имитационного моделирования / Я. И. Шамлицкий, Е. В. Александров, Е. И. Морозов // Естественные и технические науки. 2023. № 2 (177). С. 130–135. EDN ORPDBH.
3. Львович Я. Е. Проблемы моделирования транспортных потоков / Я. Е. Львович, Ю. П. Преображенский, Е. Ружицкий // Вестник Воронежского

- института высоких технологий. 2022. № 3 (42). С. 72–74. EDN ARUBKQ.
4. Грязнов Н. А. Обмен навигационной информацией для оперативного управления дорожным движением / Н. А. Грязнов // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22, № 1. С. 33–56. DOI: 10.15622/ia.22.1.2. EDN IEWXTF.
 5. Zhang S., Hu X., Chen J., et al. An effective variational auto-encoder-based model for traffic flow imputation. *Neural Comput & Applic.* 36, 2617–2631 (2024). DOI: 10.1007/s00521-023-09127-2.
 6. Li T. Mathematical Modelling of Traffic Flows. In: Hou, T. Y., Tadmor, E. (eds) *Hyperbolic Problems: Theory, Numerics, Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2003. DOI: 10.1007/978-3-642-55711-8_65.
 7. Valuev A. M. Quasi-stationary Approach in Mathematical Modeling of Traffic Flows Dynamics in a City Road Network. In: Kozlov V., Buslaev A., Bugaev A., Yashina M., Schadschneider A., Schreckenberg M. (eds) *Traffic and Granular Flow '11*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-39669-4_39.
 8. Richter M., Paszkowski J. Modelling of traffic flow characteristics of traffic calmed roads. In: Brauweiler H. C., Kurchenkov V., Abilov S., Zirkler B. (eds) *Digitalization and Industry 4.0: Economic and Societal Development*. Springer Gabler, Wiesbaden. 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-27110-7_17.
 9. Chakroborty P., Maurya A. K. Modelling of Traffic Flow from an Engineer's Perspective. In: Appert-Rolland C., Chevoir F., Gondret P., Lassarre S., Lebacque J. P., Schreckenberg M. (eds) *Traffic and Granular Flow '07*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-77074-9_1.
 10. Локтионова А. Г. Определение динамического показателя автомобиля в транспортных потоках городской транспортной системы / А. Г. Локтионова, А. Г. Шевцова // Мир транспорта и технологических машин. 2023. № 1–2 (80). С. 37–42. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-37-42. EDN AUSIDO.
 11. Коновалова Т. В. Научные исследования в области моделирования транспортных потоков / Т. В. Коновалова, С. Л. Надирян, В. М. Плаксунова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). 2023. № 3. С. 33–36. EDN PZOYTB.
 12. Щеглов В. И. Организация и распределение транспортных потоков на основе методов математического моделирования / В. И. Щеглов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 7 (103). С. 563–574. EDN OUZSMJ.
 13. Liu H. Prediction Models of Traffic Flow Driven Based on Multi-Dimensional Data in Smart Traffic Systems. In: *Smart Cities: Big Data Prediction Methods and Applications*. Springer, Singapore. 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-2837-8_7.
 14. Gribova V. V., Shamray N. B. & Fedorishchev L. A. Traffic modeling flows in a developing urban infrastructure with a software suite for creating interactive virtual environments. *Autom Remote Control*. 78, 235–246 (2017). DOI: 10.1134/S0005117917020047.
 15. Ананенко А. О. Беспилотные транспортные средства: проблемы практического использования / А. О. Ананенко // Административное право и процесс. 2022. № 8. С. 71–74. DOI: 10.18572/2071-1166-2022-8-71-74. EDN ZSGBTB.
 16. Асанкожоев Е. Ж. Грузовые беспилотные транспортные средства / Е. Ж. Асанкожоев, А. Н. Коркишко // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11 (95). С. 755–761. EDN FXVCDL.
 17. Мороз С. М. Алгоритмы выявления отказов и последующего противоаварийного управления отказавшим беспилотным транспортным средством / С. М. Мороз // Автомобильная промышленность. 2023. № 8. С. 8–13. EDN RHHTKN.
 18. Бекларян А. Л. Новая программная платформа для моделирования транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей / А. Л. Бекларян // Вестник ЦЭМИ. 2023. Т. 6, № 1. DOI: 10.33276/S265838870025116-0. EDN IDQZTT.
 19. Małeckı K., Kamiński M., Waś J. A Multi-cell Cellular Automata Model of Traffic Flow with Emergency Vehicles: Effect of a Corridor of Life. In: Paszynski M., Kranzlmüller D., Krzhizhanovskaya V. V., Dongarra J. J., Sliot P. M. A. (eds) *Computational Science — ICCS 2021*. ICCS 2021. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12742. Springer, Cham. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77961-0_4.
 20. Барагунова Л. А. Продольные колебания стержней от динамических и кинематических возмущений / Л. А. Барагунова, М. М. Шогенова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022. Т. 49, № 2. С. 87–93. DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-87-93. EDN TFGQEK.
 21. Тарлаковский Д. В. Продольные нестационарные колебания конечного моментного упругого стержня / Д. В. Тарлаковский, Г. В. Федотенков, Ч. Май Куок // Проблемы прочности и пластичности. 2023. Т. 85, № 3. С. 390–403. DOI 10.32326/1814-9146-2023-85-3-390-403. EDN PJJITC.

22. Смагин Б. И. Решение задачи Коши для уравнения колебаний струны / Б. И. Смагин // Наука и Образование. 2023. Т. 6, № 2. EDN VQRBFM.
23. Орлянская Т. И. Использование следствий из принципа Даламбера для механической системы при решении задач динамики сложных механических систем / Т. И. Орлянская // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 88–1. С. 24–28. DOI: 10.18411/trnio-08–2022–06. EDN JWXMUK.
24. Wu Cx., Zhang P., Wong S. C., et al. Solitary wave solution to Aw-Rascle viscous model of traffic flow. *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 34, 523–528 (2013). DOI: 10.1007/s10483-013-1687-9.
25. Schmidt G. Shock waves of a continuous model of traffic flow. *Computing.* 9, 365–381 (1972). DOI: 10.1007/BF02241610.
26. Raphael E. Stern, Shumo Cui, Maria Laura Delle Monache, et. al. Work, Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies.* 2018. Vol. 89. P. 205–221, ISSN 0968–090X, DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.005.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2024. Vol. 10, no. 2. P. 166–177
DOI: 10.20295/2412-9186-2024-10-02-166-177

Simulation of single-lane traffic flow of self-driving cars based on the theory of following the leader

Information about authors

Kuverin I. Yu., PhD in Engineering, Associate Professor. E-mail: igorkuv@mail.ru

Gusev S. A., Doctor of Economics, Professor, Head of the Department.

E-mail: o051nm@yandex.ru

Zernov A. A., Postgraduate Student. E-mail: inform2@rusptk.com

Blinov D. G., Postgraduate Student. E-mail: bdg@rusptk.com

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Department of “Organization of transportation, traffic safety and car service”, Saratov

Abstract. The features of modeling the movement of unmanned vehicles are investigated and approaches to modeling the flow of unmanned vehicles are being developed, taking into account promising solutions based on setting algorithms for vehicle behavior to ensure the target indicators of the transport process. Factors that take into account the features of unmanned vehicles modeling are proposed: priority for certain categories of vehicles, creation of separate parking lots, dynamic transfer from one route vehicle to another on the move, dynamic charging or refueling, dynamic cargo overload, multi-tiered vehicles, multi-link auto-driving without physical connection of individual links, high-speed movement of vehicles in conditions of high flow density. Also, using a specific example of the development of a macromodel of unmanned vehicles movement in conditions of high flow density, the features of it modeling movement are shown, consisting in the initial task of algorithms for the behavior of an autonomous vehicle, on the basis of which a model of traffic flow is already being built in the future.

Keywords: unmanned vehicles, traffic flow modeling, oscillation theory, control theory, physical interpretation, transport network, digital twin, self-similar reduction, micromodel, macromodel.

References

1. Bobrovskaja O. P. Problemy modelirovaniya smeshannogo transportnogo potoka / O. P. Bobrovskaja, T. V. Gavrilenko // *Uspehi kibernetiki.* 2023. T. 4, № 3. S. 39–46. DOI: 10.51790/2712-9942-2023-4-3-04. EDN ZQPFZJ. (In Russian)
2. Shamlickij Ja. I. Modelirovanie transportnyh potokov sredstvami imitacionnogo modelirovaniya / Ja. I. Shamlickij, E. V. Aleksandrov, E. I. Morozov // *Estestvennye i tehnicheckie nauki.* 2023. № 2 (177). S. 130–135. EDN ORPDBH. (In Russian)
3. L'vovich Ja. E. Problemy modelirovaniya transportnyh potokov / Ja. E. L'vovich, Ju. P. Preobrazhenskij, E. Ruzhickij // *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tehnologij.* 2022. № 3 (42). S. 72–74. EDN ARUBKQ. (In Russian)
4. Grjaznov N. A. Obmen navigacionnoj informaciej dlja operativnogo upravlenija dorozhnym dvizheniem / N. A. Grjaznov // *Informatika i avtomatizacija.* 2023. T. 22, № 1. S. 33–56. DOI: 10.15622/ia.22.1.2. EDN IEWXTF. (In Russian)
5. Zhang S., Hu X., Chen J., et al. An effective variational auto-encoder-based model for traffic flow imputation. *Neural Comput & Applic.* 36, 2617–2631 (2024). DOI: 10.1007/s00521-023-09127-2.
6. Li T. Mathematical Modelling of Traffic Flows. In: Hou T. Y., Tadmor E. (eds) *Hyperbolic Problems: Theory, Numerics, Applications.* Springer, Berlin, Heidelberg. 2003. DOI: 10.1007/978-3-642-55711-8_65.
7. Valuev A. M. Quasi-stationary Approach in Mathematical Modeling of Traffic Flows Dynamics in a City Road Network. In: Kozlov V., Buslaev A., Bugaev A., Yashina M., Schadschneider A., Schreckenberg M. (eds) *Traffic and Granular Flow '11.* Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-39669-4_39.
8. Richter M., Paszkowski J. Modelling of traffic flow characteristics of traffic calmed roads. In: Brauweiler H.C., Kurchenkov V., Abilov S., Zirkler B. (eds) *Digitalization and Industry 4.0: Economic and Societal Development.* Springer Gabler, Wiesbaden. 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-27110-7_17.
9. Chakroborty P., Maurya A. K. Modelling of Traffic Flow from an Engineer's Perspective. In: Appert-Rolland C., Chevoir F., Gondret P., Lassarre S., Lebacque J. P., Schreckenberg M. (eds) *Traffic and Granular Flow '07.* Springer, Berlin, Heidelberg. 2009. DOI: 10.1007/978-3-540-77074-9_1.
10. Loktionova A. G. Opredelenie dinamiceskogo pokazatelya avtomobilja v transportnyh potokah gorodskoj transportnoj sistemy / A. G. Loktionova, A. G. Shevcova // *Mir transporta i tehnologicheskikh mashin.* 2023. № 1–2 (80). S. 37–42. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-37-42. EDN AUSIDO. (In Russian)
11. Konovalova T. V. Nauchnye issledovanija v oblasti modelirovaniya transportnyh potokov / T. V. Konovalova, S. L. Nadjirjan, V. M. Plaksunova // *Nauka. Tehnika. Tehnologii (politehnicheskij vestnik).* 2023. № 3. S. 33–36. EDN PZOYTB. (In Russian)
12. Shheglov V. I. Organizacija i raspredelenie transportnyh potokov na osnove metodov matematicheskogo modelirovaniya / V. I. Shheglov // *Inzhenernyj vestnik Dona.* 2023. № 7 (103). S. 563–574. EDN OUZSMJ. (In Russian)
13. Liu H. Prediction Models of Traffic Flow Driven Based on Multi-Dimensional Data in Smart Traffic Systems. In: *Smart Cities: Big Data Prediction Methods and Applications.* Springer, Singapore. 2020. DOI: 10.1007/978-981-15-2837-8_7.
14. Gribova V. V., Shamray N. B. & Fedorishchev L. A. Traffic modeling flows in a developing urban infrastructure with a software suite for creating interactive virtual environments. *Autom Remote Control.* 78, 235–246 (2017). DOI: 10.1134/S0005117917020047.

15. Ananenko A. O. Bepilotnye transportnye sredstva: problemy prakticheskogo ispol'zovanija / A. O. Ananenko // *Administrativnoe pravo i process*. 2022. № 8. S. 71–74. DOI: 10.18572/2071-1166-2022-8-71-74. EDN ZSGBTB. (In Russian)
16. Asankozhiov E. Zh. Gruzovye bespilotnye transportnye sredstva / E. Zh. Asankozhiov, A. N. Korkishko // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. № 11(95). S. 755–761. EDN FXVCDL. (In Russian)
17. Moroz S. M. Algoritmy vyjavlenija otkazov i posledujushhego protivovarijnogo upravlenija otkazavshim bespilotnym transportnym sredstvom / S. M. Moroz // *Avtomobil'naja promyshlennost'*. 2023. № 8. S. 8–13. EDN RHHTKN. (In Russian)
18. Beklarjan A. L. Novaja programmaja platforma dlja modelirovanija transportnyh potokov s uchastiem bespilotnyh avtomobilej / A. L. Beklarjan // *Vestnik CJeMl*. 2023. T. 6, № 1. DOI: 10.33276/S265838870025116-0. EDN IDQZTT. (In Russian)
19. Małeckı K., Kamiński M., Wąs J. A Multi-cell Cellular Automata Model of Traffic Flow with Emergency Vehicles: Effect of a Corridor of Life. In: Paszynski M., Kranzlmüller D., Krzhizhanovskaya V. V., Dongarra J. J., Sloat P. M. A. (eds) *Computational Science — ICCS 2021. ICCS 2021. Lecture Notes in Computer Science* (). Vol 12742. Springer, Cham. 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-77961-0_4.
20. Baragunova L. A. Prodol'nye kolebanija sterzhnej ot dinamičeskikh i kinematicheskikh vozmushhenij / L. A. Baragunova, M. M. Shogenova // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Tehničeskije nauki*. 2022. T. 49, № 2. S. 87–93. DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-87-93. EDN TFGQEK. (In Russian)
21. Tarlakovskij D. V. Prodol'nye nestacionarnye kolebanija konečnogo momentnogo uprugogo sterzhnja / D. V. Tarlakovskij, G. V. Fedotenkov, Ch. Maj Kuok // *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2023. T. 85, № 3. S. 390–403. DOI: 10.32326/1814-9146-2023-85-3-390-403. EDN PJJITC. (In Russian)
22. Smagin B. I. Reshenie zadachi Koshi dlja uravnenija kolebanij struny / B. I. Smagin // *Nauka i obrazovanie*. 2023. T. 6, № 2. EDN VQRBFM. (In Russian)
23. Orljanskaja T. I. Ispol'zovanie sledstvij iz principa Dalamberta dlja mehanicheskoj sistemy pri reshenii zadach dinamiki slozhnyh mehanicheskikh sistem / T. I. Orljanskaja // *Tendencii razvitija nauki i obrazovanija*. 2022. № 88–1. S. 24–28. DOI: 10.18411/trnio-08-2022-06. EDN JWXMUK. (In Russian)
24. Wu Cx., Zhang P., Wong S. C., et al. Solitary wave solution to Aw-Rascle viscous model of traffic flow. *Appl. Math. Mech.-Engl. Ed.* 34, 523–528 (2013). DOI: 10.1007/s10483-013-1687-9.
25. Schmidt G. Shock waves of a continuous model of traffic flow. *Computing*. 9, 365–381 (1972). DOI: 10.1007/BF02241610.
26. Raphael E. Stern, Shumo Cui, Maria Laura Delle Monache, et. al. Work, Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 89. P. 205–221. ISSN 0968–090X. DOI: 10.1016/j.trc.2018.02.005.