

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОЛОННЫ АВТОМОБИЛЕЙ В ТЕРМИНАХ
ЗАДАЧИ СЛЕДОВАНИЯ ЗА ЛИДЕРОМ

А.С.Девятисильный, А.К.Стоценко (Владивосток)

Введение

В условиях роста как количества автомобилей, так и скорости их движения, все большую важность приобретает проблема безопасности движения автомобиля (далее - ТС) в плотном потоке. Совершенствуя пассивную безопасность автомобилей, производители опираются на результаты испытаний по методикам EuroNCAP, NHTSA, ECE R94, ECE R12, учитывающим достаточно малую долю возможных условий ДТП. Меры пассивной безопасности не в состоянии качественно сократить ущерб от ДТП.

Одной из наиболее распространенных причин ДТП является неспособность автотранспортного средства, движущегося в потоке, своевременно учесть изменения скорости и режима работы двигатель-тормозной системы впереди идущих, что приводит к запаздыванию его реакции.

При этом ответственность за отсутствие столкновений возлагается на идущие позади автотранспортные средства, что позволяет рассматривать поток автотранспортных средств как одномерный, линейный и ввести в качестве базового элемента потока пару автотранспортных средств.

Теоретико-механическая модель управляемого продольного движения

Рассмотрим теоретико-механическую модель продольного движения транспортных единиц, описанную ранее в работах авторов [1,2].

Модель управляемого продольного движения базового системообразующего элемента транспортного потока - отдельно взятой транспортной единицы (далее - ТЕ), представима в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{R} &= V, R(0) = R_0, \\ \dot{V} &= F - S - g_v, V(0) = V_0, S = A + Q, \\ \dot{F} &= -\mu(F - \varphi(V_d)) + \gamma(V - V_d) + T, F(0) = F_0, \end{aligned} \quad 1)$$

где R - расстояние, пройденное ТЕ; V - линейная скорость движения ТЕ, $V \geq 0$; F , S - удельные силы (далее - силы), создаваемые соответственно двигатель-тормозной системой ТЕ и силами сопротивления движению, $A = 0,5kV^2$ - сила аэродинамического сопротивления [2], $0,5k$ - фактор обтекаемости, $k = 2c\rho\sigma$, c - коэффициент лобового сопротивления, ρ - плотность воздуха, $\sigma = \alpha BH / m$ - лобовая удельная площадь ТЕ, α - коэффициент заполнения лобовой площади, B и H - наибольшие ширина и высота ТЕ, m - масса ТЕ, Q - сила сопротивления качению, причем $Q = fg$ при $V > 0$, g - ускорение свободного падения, f - коэффициент сопротивления качению; T - сила торможения; g_v - проекция ускорения свободного падения на направление движения, далее полагаем $g_v = 0$; V_d - задаваемая скорость движения ТЕ, $\varphi(V_d)$ - удельная сила, реализующая задаваемое движение, $\mu = \tau^{-1}$, τ - постоянная времени реализации силы F ; γ - коэффициент обратной связи, поддерживающей режим заданного движения. Значение τ зависит от того, каким

образом осуществляется управление ТЕ - в режиме так называемого "ручного" управления (пилотом), или в автоматическом режиме (случай роботизированной ТЕ).

Полагая, что движение каждой ТЕ удовлетворяет системе уравнений (1) и обозначая индексами $i = \overline{1,2}$ соответствующие ТЕ₁ и ТЕ₂ переменные состояния (R, V, F) и параметры, запишем уравнения относительного движения ТЕ, а именно:

$$\begin{aligned} \dot{r} &= v, \quad r(t_m) = r_m, \\ \dot{v} &= F_1 - S_1 - F_2 + S_2, \quad v(t_m) = v_m, \end{aligned} \quad 2)$$

где t_m - момент времени начала мониторинга относительного движения; $r = R_1 - R_2 - d_0$, $v = V_1 - V_2$, d_0 - динамически поддерживаемое значение заданной дистанции между ТЕ. Как видно из (1), управление относительным движением возможно формированием каждой из сил F_1 или F_2 , при этом один из объектов (в данном случае - ТЕ₁ или ТЕ₂) выполняет ординарное движение, или одновременным формированием сил F_1 и F_2 с одинаковыми или отличающимися схемами обратных связей по переменным r и v , текущие значения которых доставляются измерителями, как локационного типа, так и навигационными спутниковыми системами.

$$F_2 = -\mu_2(F_2 - \varphi_2(V_d)) - \gamma_2 v - \beta_2 - T_2, \quad 3)$$

где γ_2 и β_2 - коэффициенты обратной связи.

Для полноты представлений о возможностях приведем таблицу (Табл.1), в которую включены двенадцать моделей управления относительным движением, способных обеспечить решение задачи его асимптотической устойчивости. Под номерами 1 и 2 в таблицу включены и рассмотренные выше 2 модели, в которых относительное движение находится под управлением либо ТЕ₁, либо ТЕ₂; "+" и "-" означают наличие или отсутствие соответствующей обратной связи.

№ модели											0	1	2
F_1	γ												
	β												
F_2	γ												
	β												

Табл. 1. Виды моделей управления относительным движением

Численное моделирование движения колонны

Рассмотренная модель была использована для определения безопасной дистанции в колонне автомобилей на марше для различного состава колонны и условий

движения. Модель была реализована с использованием среды MATLAB. Численное решение было получено с использованием метода Рунге-Кутты 4 и 5 порядков. Обратная связь в экспериментах 1,2,3 была реализована исходя из предположения, что управление в каждой паре возложено на позади идущего, по модели 2 согласно Табл. 1 соответственно. Параметры модели подобраны таким образом, что, модели с данными параметрами асимптотически устойчивы. Условия Рауса-Гурвица удовлетворяются [2]. Колонны формировались из следующих моделей автомобилей [4][5][6][7][8]:

Табл. 3. Модели автомобилей в численных экспериментах

Место в колонне (эксперимент №1)	1	2	3	4	5
модель	ГАЗ-3308 "Садко"	КАМАЗ-4310	УР АЛ-4320	УР АЛ-5323	ГАЗ-2330 "Тигр"
длина, м.	6,4	7,7	7,4	8,6	5,7
ширина, м.	2,4	2,5	2,5	2,6	2,4
высота, м.	2,6	3,6	2,7	3,2	2,5
масса, кг	4100,0	8400,0	1300,0	1260,0	7200,0
скорость, км/ч	100,0	85,0	85,0	85,0	140,0
скорость, м/с	27,8	23,6	23,6	23,6	38,9
л.с.	124,0	220,0	230,0	260,0	180,0

Эксперименты проводились на временном интервале в 250 секунд: в течение 240 секунд колонна начинает движение из строя с начальными дистанциями между машинами по 50 метров и осуществляет разгон. На 240 секунде эксперимента первый автомобиль в потоке останавливается (в силу наезда на препятствие, неисправности или ДТП), и, таким образом, становится, препятствием на полосе движения и в течении последующих 10 секунд осуществляется остановка оставшихся 4 автомобилей колонны. Значение μ во всех экспериментах было принято равным 1, что соответствует замедленной реакции, имеющей место, например, в условиях ограниченной видимости.

Ниже представлены результаты экспериментов. Графики с литерами а и b соответствуют выходу ТЕ на заданный режим движения (первые 240 секунд эксперимента), графики с литерами с и d описывают движение ТЕ2, ТЕ3, ТЕ4, ТЕ5 после остановки ТЕ1. Эксперименты строились в относительных координатах, за 0 принималось положение ТЕ1. Для движения звена во всех экспериментах была выбрана скорость V_d , равная 14 м/с (50 км/ч), В экспериментах 1 и 2 колонна была составлена из 5 автомобилей различных типов, указанных в таблице 2. В эксперименте 1 дистанция в 25 метров была задана исходя из используемого на автомобильном транспорте норматива как половина скорости в км/ч. В эксперименте 2 дистанция в 40 метров была избрана в целях повышенной безопасности движения. Уместно заметить, что требованиям Строевого устава Вооруженных Сил РФ [9] удовлетворяют дистанции в колонне от 25 до 50 метров. В третьем и четвертом экспериментах колонна была

составлена из 5 однотипных автомобилей модели КАМАЗ-4310 с дистанцией 25 метров. Для демонстрации асимметрии возможностей управления в парах в четвертом эксперименте управление в каждой паре возложено на впереди идущего, по модели 1 согласно Табл.1.

В эксперименте 1 относительная дистанция в первых двух парах приняла отрицательные значение, что означает столкновение с впереди идущим - второй автомобиль столкнулся с первым, третий - со вторым. В эксперименте 2 столкновения с лидером колонны удалось избежать.

В экспериментах 3,4 колонна, составленная из грузовиков одной модели, избежала столкновения в условиях, в которых оно могло произойти в колонне из разнотипных транспортных средств. Причем, большая эффективность замедления была зафиксирована в эксперименте 3, при управлении со стороны ведомого, по модели 2 согласно Табл. 1. В этом проявляется значимое свойство асимметрии управления, которое так же легко отследить по динамике набора скорости в колонне (рисунки 3b, 4b). На рисунках 1b, 2b, 3b, 4b в третьей и четвертой парах ТЕ наблюдаются колебания относительной скорости v_{34} и v_{45} порядка $10^{-3} g$, обусловленные незначительными нарушениями комфортности движения в силу нелинейности реальной модели.

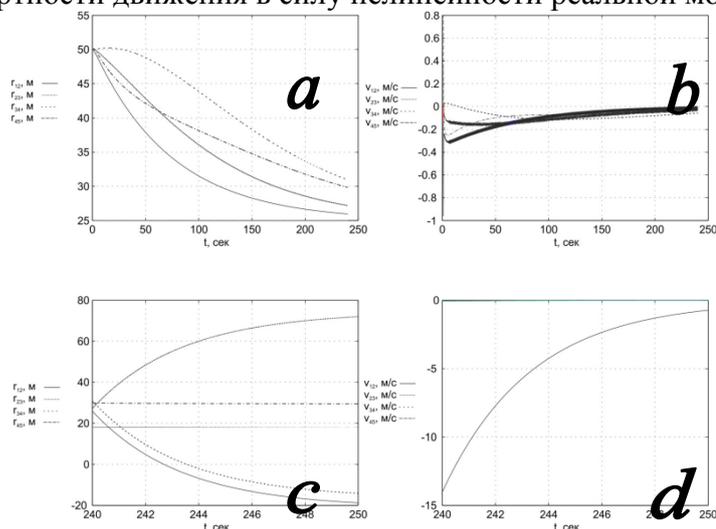


Рис. 1. Результаты эксперимента 1 в относительных координатах

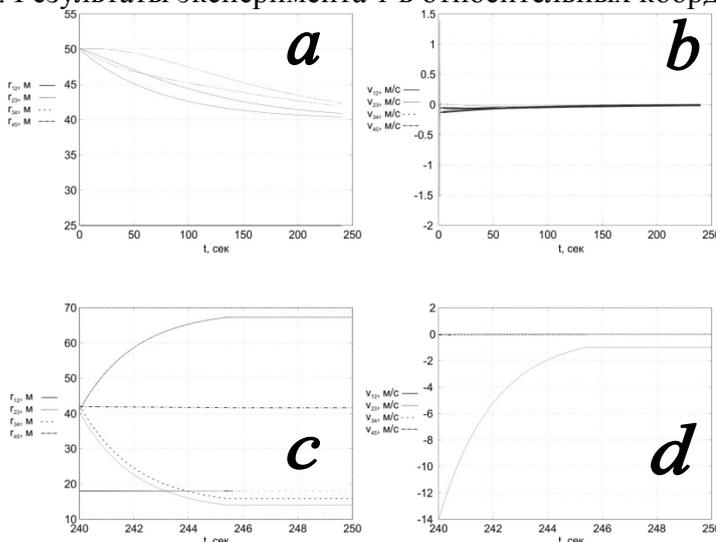


Рис. 2. Результаты эксперимента 2 в относительных координатах

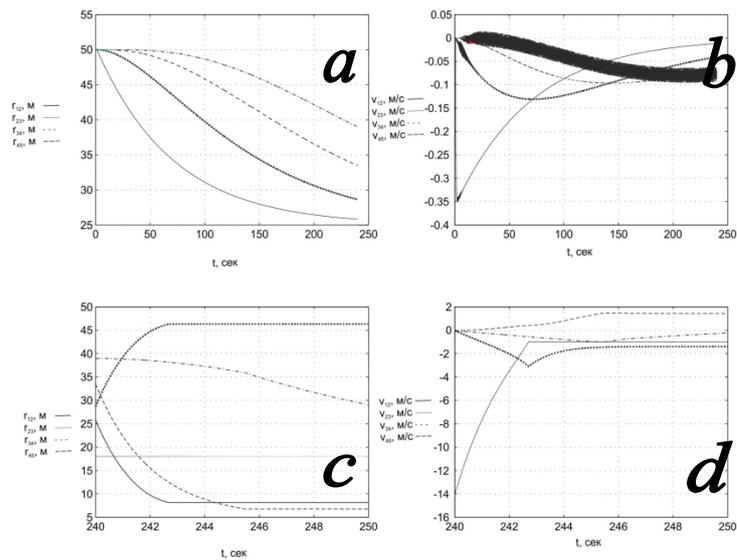


Рис. 3. Результаты эксперимента 3 в относительных координатах

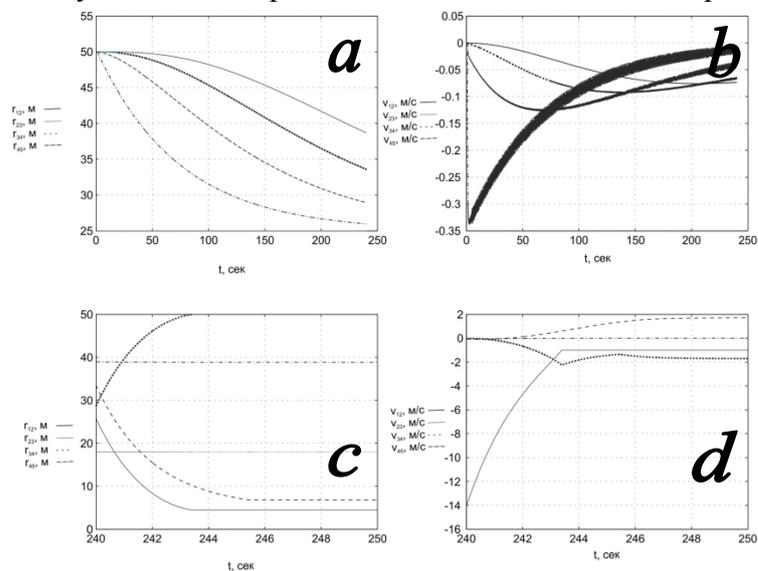


Рис. 4. Результаты эксперимента 4 в относительных координатах

Выводы

Предлагаемая механическая модель одномерного линейного потока транспортных средств и методы ее численного решения позволяют решать ряд прикладных задач, связанных с определением безопасной дистанции и режима движения для различных типов транспортных средств и дорожных условий.

Литература

1. **Девятисильный А.С., Дорошко В.М.** Исследование задачи автоматического следования за лидером в системе двух транспортных единиц // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. №2. с. 163-169.
2. **Девятисильный А.С., Стоценко А.К.** Модели управления относительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 2000. №2. с. 163-169.

3. **Тарасик В.П.** Теория движения автомобиля // СПб.: БХВ, 2006. 478 с.
4. ГАЗ-2330 «Тигр»// [Материал из Википедии — свободной энциклопедии] / URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/ГАЗ-2330_«Тигр» (дата обращения: 24.04.2015)
5. КамАЗ-4310// [Материал из Википедии — свободной энциклопедии] / URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/КамАЗ-4310> (дата обращения: 24.04.2015)
6. ГАЗ-3308// [Материал из Википедии — свободной энциклопедии] / <https://ru.wikipedia.org/wiki/ГАЗ-3308> (дата обращения: 24.04.2015)
7. Урал-4320// [Материал из Википедии — свободной энциклопедии] / URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Урал-4320> (дата обращения: 24.04.2015)
8. Урал-5323// [Материал из Википедии — свободной энциклопедии] / URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Урал-5323> (дата обращения: 24.04.2015)
9. Строевой устав Вооружённых Сил Российской Федерации. Глава 5. Строи взвода, роты, батальона и полка на машинах. // — М.: Воениздат, 1993.