

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ В ТРАНСПОРТНОМ ПОТОКЕ НА ЭВМ**

*В статье выполнен анализ ряда недостатков модели «разумного водителя» и предложено изменить структуру математической модели и ввести в неё дополнительные функции, связывающие ускорение автомобиля с его динамическими параметрами и условиями движения при разгоне и торможении.*

**Ключевые слова:** автомобиль, ускорение, замедление, математическая модель, транспортный поток, условия движения.

A.N. Arkhangelsky

## **MODELING THE CAR MOTION IN A TRANSPORT FLOW ON A COMPUTER**

*In this work, a critical analysis of the mathematical model of the Traiber is performed and a new model is developed, based on the concept of "following the leader" and which allows you to take into account the dynamic characteristics of a particular car, its load, road and climatic conditions of operation, as well as more realistic modeling of acceleration processes. braking and stopping the vehicle.*

**Keywords:** car, acceleration, deceleration, mathematical model, traffic flow, traffic conditions.

### **Введение**

В последние годы в России в сфере автомобильного транспорта произошли очень серьёзные изменения: существенно изменилась структура парка; резко увеличилось количество автотранспортных средств, прежде всего, личного пользования. Транспортные проблемы проявились во всей их масштабности и сложности решения. Наличие в них мощной стохастической составляющей, требует применения для их решения адекватных современных инструментов и методов имитационного моделирования (ИМ) на ЭВМ.

Один из видов имитационного моделирования – микромоделирование, позволяет оценить динамику движения каждого отдельного автомобиля, задержки на перекрестках, динамику формирования и расформирования очередей автомобилей и другие показатели транспортного потока и также оценивать эффективность управленческих решений, направленных на улучшение организации движения автотранспортных средств.

Основной концепцией в моделировании является концепция следования за лидером с безопасной дистанцией. Модели следования за лидером позволяют исследовать общую картину состояния транспортных потоков, учитывая индивидуальное поведение транспортных средств и его вероятностный характер. Общепринятой моделью для решения таких задач в настоящее время считается психофизиологическая модель восприятия Видемана [1].

Идея модели Видемана состоит в том, что водитель автотранспортного средства ориентируется на поведение впереди движущего автомобиля и стремится двигаться за ним на расстоянии не менее безопасного для конкретных условий движения. Модель была представлена Видеманом в 1974 году [1].

Для описания процесса движения автомобиля используется общая микроскопическая модель «разумного водителя» Трайбера (*Intelligent Driver Model (IDM)*) [3, 6]. Примерами использования этой модели являются такие известные программные продукты как RTVisionVISSIM, COS.SIM [5].

Расчетные зависимости этой модели представлены ниже.

$$a(t) = a_{авт} \left[ 1 - \left( \frac{V_a(t)}{V_{жс}} \right)^\delta - \left( \frac{d_{\min} + t_p \cdot V_a(t) - \frac{V_a(t)(V_l(t) - V_a(t))}{2\sqrt{a_{авт}b_{авт}}}}{X_l(t) - X_a(t)} \right)^2 \right];$$

$$V_a(t + \Delta t) = V_a(t) + a(t) \cdot \Delta t;$$

$$V_l(t + \Delta t) = V_l(t) + a_l(t) \cdot \Delta t;$$

$$X_a(t + \Delta t) = X_a(t) + \frac{V_a(t) + V_a(t + \Delta t)}{2} \Delta t + \frac{a(t) \cdot \Delta t^2}{2};$$

$$X_l(t + \Delta t) = X_l(t) + \frac{V_l(t) + V_l(t + \Delta t)}{2} \Delta t + \frac{a_l(t) \cdot \Delta t^2}{2},$$

где  $a(t)$  – ускорение автомобиля в момент времени  $t$ , м/с<sup>2</sup>;

$a_{авт}$  – постоянное «комфортное» ускорение, м/с<sup>2</sup>;

$V_a(t)$  – скорость автомобиля в момент времени  $t$ , м/с

$V_{жс}$  – желаемая (комфортная) скорость автомобиля;

$\delta$  – показатель динамичности разгона («агрессивность» вождения);

$d_{\min}$  – минимальное расстояние между автомобилями в очереди, м;

$t_p$  – время реакции водителя, с;

$b_{авт}$  – величина «комфортного» замедления при торможении автомобиля, м/с<sup>2</sup>;

$X_a(t)$  – линейная координата положения автомобиля в момент времени  $t$ , м;

$X_l(t)$  – линейная координата положения лидера в момент времени  $t$ , м;

Зависимость для расчета текущего значения ускорения автомобиля состоит из двух частей:

$$a_{авт} \left[ 1 - \left( \frac{V_a(t)}{V_{жс}} \right)^\delta \right] - \text{часть, отвечающая за ускорение движения автомобиля};$$

$$a_{авт} \left[ \left( \frac{d_{\min} + t_p \cdot V_a(t) - \frac{V_a(t)(V_l(t) - V_a(t))}{2\sqrt{a_{авт}b_{авт}}}}{X_l(t) - X_a(t)} \right)^2 \right] - \text{часть, отвечающая за замедление}$$

движения автомобиля.

Как отмечают многие исследователи, например [4], этой модели присущи ряд недостатков, которые требуют их устранения.

**Первый недостаток** при использовании модели – это член в формуле  $1 - \left( \frac{V_a(t)}{V_{жс}} \right)^\delta$ .

Степень изменения динамики зависит от величины коэффициента  $\delta$ , вариация значений которого теоретически должна имитировать многообразие возможных траекторий управления автомобилем, но не имеет физического обоснования. Поэтому, при применении модели «следования за лидером» использование этого члена является излишним, так как именно «лидер» обеспечивает ограничение по максимальной скорости.

**Второй недостаток** модели – это назначение величины  $a_{авт}$ .

Во многих литературных источниках (например в [3]) предлагается назначать эту величину постоянной в диапазоне  $2...4 \text{ м/с}^2$ . Такая рекомендация полностью противоречит положениям теории эксплуатационных свойств автомобиля [2], в соответствии с которой динамика автомобиля, определяемая реализуемым его ускорением, зависит от параметров двигателя, параметров трансмиссии, массы автомобиля, дорожных условий и других факторов. Поэтому, рекомендации по назначению величины должны быть связаны с реальными параметрами конкретного автомобиля, или хотя бы группы подобных по динамическим характеристикам автомобилей.

Для оценки динамики движения автомобиля используем его одномассовую модель, описываемую уравнением

$$m_a \cdot \delta_{ep(i)} \frac{dV}{dt} = A(i) \cdot V^2 + B(i) \cdot V + C(i)$$

$$\text{Откуда } a_{(i)} = \frac{A(i) \cdot V^2 + B(i) \cdot V + C(i)}{m_a \cdot \delta_{ep(i)}}$$

Для определения коэффициентов  $A(i)$ ,  $B(i)$ ,  $C(i)$ , входящих в уравнение используются следующие выражения:

$$A(i) = \left[ \frac{1000 \cdot N_{e\max} \cdot K_p \cdot \eta_{TP(I)} \cdot r_k \cdot c}{V_{N(i)}^3 \cdot r_\partial} + k_B \cdot F + k_f \cdot G_a \cdot \cos \alpha \right];$$

$$B(i) = \frac{1000 \cdot N_{e\max} \cdot K_p \cdot \eta_{TP(I)} \cdot r_k \cdot b}{V_{N(i)}^2 \cdot r_\partial};$$

$$C(i) = \frac{1000 \cdot N_{e\max} \cdot K_p \cdot \eta_{TP(I)} \cdot r_k \cdot a}{V_{N(i)} \cdot r_\partial} - G_a (f_0 + \sin \alpha);$$

$$V_{(N)} = 0.105 \frac{n_N \cdot r_k}{U_{T(i)}}; \quad k_B = 0.5 \cdot c_x \cdot \rho_B; \quad \eta_{TP} = \eta_K \cdot \eta_{кар} \cdot \eta_{ГП};$$

$$N_e = N_{e\max} \cdot \left[ a \frac{n}{n_N} + b \cdot \left( \frac{n}{n_N} \right)^2 - c \left( \frac{n}{n_N} \right)^3 \right].$$

Использование приведенных выше формул позволяет рассчитать величины ускорения автомобиля на разных передачах. Пример графиков построенных по результатам таких расчетов для автобуса ЛиАЗ-429260 приведены на рис.1. При выполнении расчетов использовались исходные данные, приведенные в таблице 1.

Для преодоления сложности связанной с многозначностью режимов управления при моделировании движения автомобиля предлагается использовать регрессионную зависимость ускорения от скорости. Параметры этой зависимости получают, используя значения ускорений на спадающей ветви графика ускорений на каждой передаче коробки перемены передач. Примеры таких зависимостей приведены на рис.2.

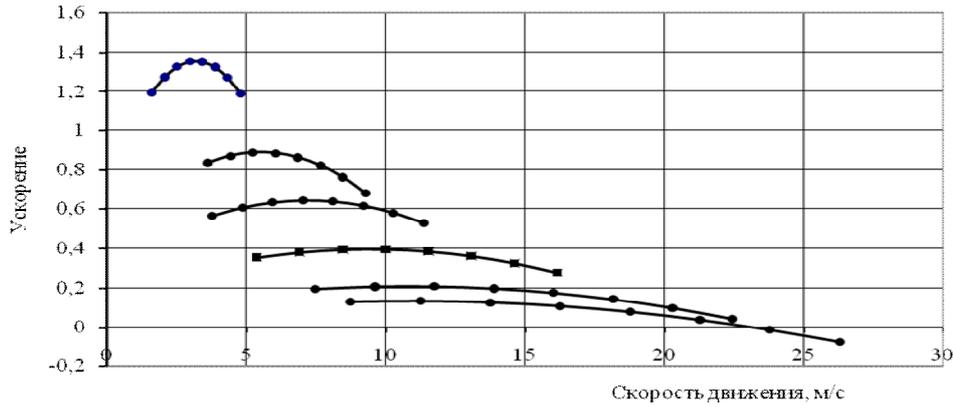


Рис. 1. Графики зависимости ускорения автобуса ЛиАЗ-429260 (загрузка 50 %) от скорости на различных передачах

Таблица 1. Исходные данные для расчета ускорения автобуса ЛиАЗ

$N_{max}=154$	$K_p=0,8$	$КПД=0,9$	$R_k=0,42$	$A=0,6879$
$R_d=0,405$	$K_B=0,5$	$F=6,891$	$K_f=0,000007$	$B=1,7478$
$G_a=117700$	$f_0=0,02$	$nN=2300$	уклон=0	$C=1,4357$
$n_{min}=700$	$n_{max}=2600$	$M_{kmax}=780/(1400)$	$U_{ГЛ}=5.73$	$U_1=3,364$
$U_2=1,909$	$U_3=1,421$	$U_4=1.0$	$U_5=0.652$	$U_6=0.615$

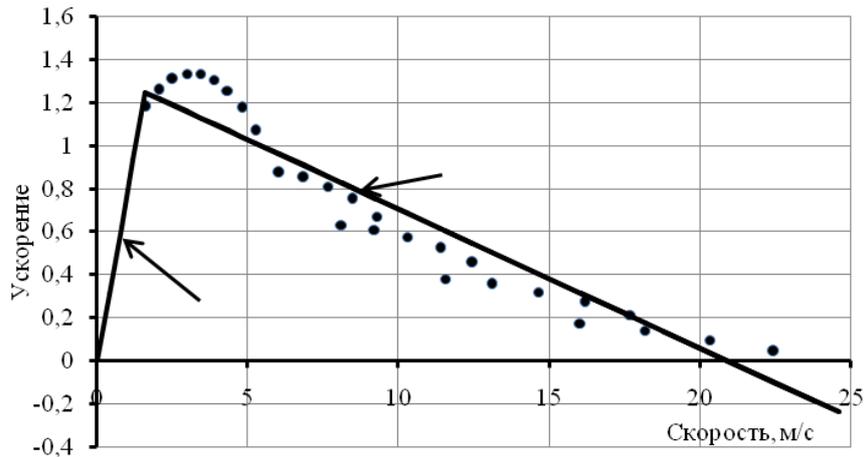


Рис. 2. Пример полученных регрессионных зависимостей для автобуса ЛиАЗ-429260 (загрузка 50 %)

При проведении численных экспериментов было установлено, что для многих автотранспортных средств без существенной потери точности можно использовать линейную форму регрессионных зависимостей: для начального участка скоростей вида  $a = k * Va$ ; основного диапазона изменения скорости вида  $a = m + n * Va$ .

Анализ зависимостей ускорения, как функции скорости, показал значимость учета для конкретного автомобиля его мощности, степени загрузки и дорожного сопротивления. В табл.2 приведены параметры регрессионных зависимостей величины ускорения автобуса ЛиАЗ-426290 для шести загрузочных состояний. Все остальные параметры модели автобуса оставались неизменяемыми.

**Третий недостаток** при использовании модели – это составляющая в общей формуле

$$\frac{V_a(t)(V_{л}(t) - V_a(t))}{2\sqrt{a_{авт}b_{авт}}}$$

Этой составляющей трудно дать физическое обоснование. Кроме того, исходная модель при моделировании остановки автомобиля дает некорректные результаты. Для

иллюстрации этой некорректности на рис.4 приведены результаты моделирования остановки автомобиля для двух случаев: величины ускорения и замедления равны  $1 \text{ м/с}^2$ ; величины ускорения и замедления равна  $2 \text{ м/с}^2$ .

Таблица 2. Параметры регрессионных зависимостей ускорения от скорости автобуса

Загрузка, %	m	n	k	Rav
0	1,8250	-0,0841	1,0290	0,924
25	1,5721	-0,0737	0,9082	0,924
50	1,3770	-0,0658	0,7940	0,924
53	1,3543	-0,0648	0,7811	0,924
75	1,2221	-0,0594	0,7037	0,924
1,0	1,0961	-0,0543	0,6304	0,936

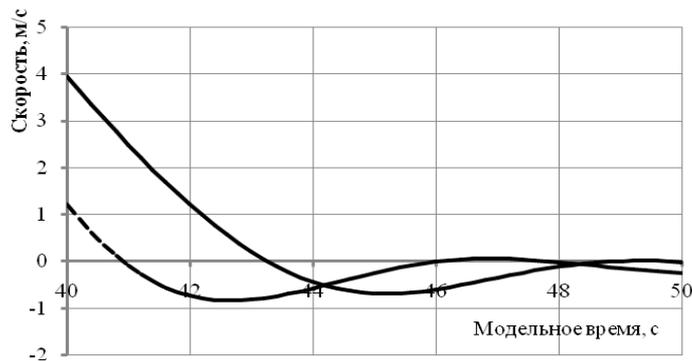


Рис. 3. Результаты моделирования движения автобуса перед его остановкой за «лидером» (модель «разумного водителя»)

С физической точки зрения при появлении необходимости применения торможения, необходимо руководствоваться требованиями обеспечения безопасности. Интервал безопасности между автомобилями складывается из: минимального расстояние между автомобилями в очереди; расстояния проезда автомобиля при известной скорости за время реакции водителя; величины тормозного пути для снижения скорости до необходимого уровня.

С учетом всего сказанного выше и для устранения этого недостатка была разработана новая математическая модель движения автотранспортного средства с двигателем внутреннего сгорания полностью удовлетворяющая как положениям теории эксплуатационных свойств автомобиля при его разгоне, так и условиям обеспечения безопасности при торможении.

Некоторые результаты машинных экспериментов с использованием разработанной модели приведены на рис. 4 - 5.

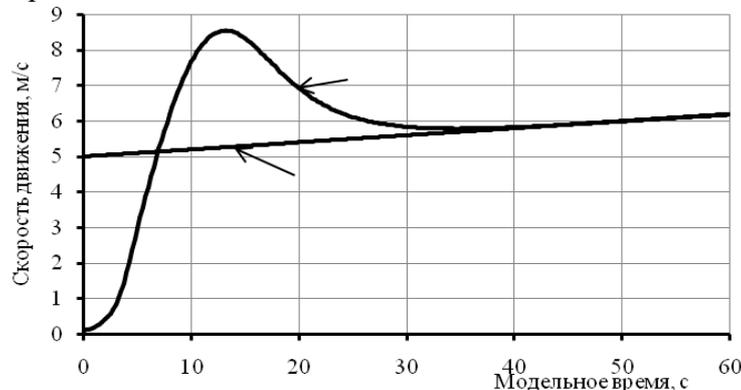


Рис. 4. Результаты моделирования скорости движения автобуса, догоняющего ускоренно двигающийся впереди автомобиль

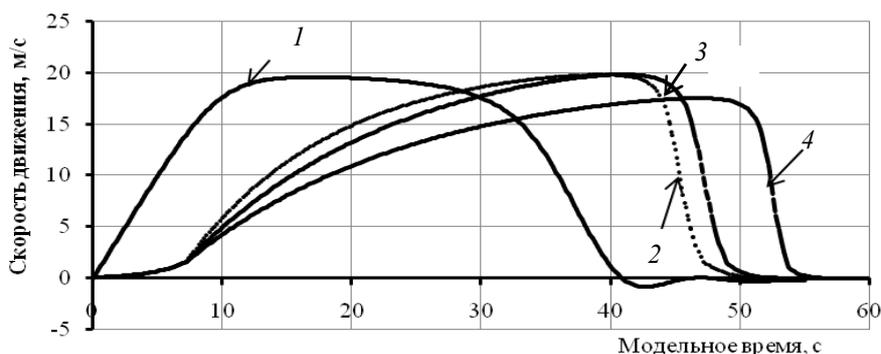


Рис. 5. Графики скорости движения автобуса ЛиАЗ между остановками с ограничением максимальной скорости 20 м/с (1 – модель Трайбера; 2, 3, 4 – предлагаемая модель загрузки соответственно 0, 50, 100 %)

В заключении следует отметить, что разработанная модель имеет неоспоримые преимущества по сравнению с моделью Трайбера так как позволяет учесть при моделировании динамические характеристики конкретного автомобиля, его загрузку, дорожные и климатические условия эксплуатации, а также более реалистично моделировать процессы разгона, торможения и остановки автотранспортного средства. Предлагаемая модель является основой для разработки модели «интеллектуального агента» с широкими возможностями моделирования транспортных процессов.

#### Список литературы:

1. Treiber, M. Christian Thiemann Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation / M. Treiber, A. Kesting. – London :Springer, 2012. P. 221–222.
2. Литвинов, А.С., Литвинов, А.С., Фаробин, Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств: учебник для вузов [Текст] / А.С.Литвинов, А.С.Литвинов, Я.Е. Фаробин.- М:Машиностроение, 1989. 240 с.
3. Кравченко, П.С., Омарова, Г.А. Моделирование и сравнение различных транспортных микромоделей [Текст] /П.С.Кравченко, Г.А. Омарова. - Проблемы информатики. 2017. № 3. С.5-15.
4. Курц, В.В., Ануфриев, И.Е. Новые микроскопические модели автомобильного трафика [Текст] /В.В. Курц, И.Е. Ануфриев. - Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2014. №4. С.50-56.
5. Панасюк, Я.С. Агентное моделирование автотранспортных потоков [Текст] / Я.С.Панасюк, В.А. Мальных., В.А.Мануйлов, И.К. Дудинов, Г.М.Черняк // Труды 53-й научной конференции МФТИ. 2010. Ч. 5. С. 130 – 131.
6. Швецов, В.И. Математическое моделирование транспортных потоков [Текст] /В.И.Швецов //Автоматика и телемеханика. – 2003. – №11. С.3-46.

#### References:

1. Treiber, M. Christian Thiemann Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation / M. Treiber, A. Kesting. - London: Springer, 2012.P. 221–222.
2. Litvinov, A.S., Litvinov, A.S., Farobin, YA.E. Avtomobil': Teoriya ekspluatacionnyh svojstv: uchebnik dlya vuzov [Tekst] / A.S. Litvinov, A.S. Litvinov, YA.E. Farobin.- M:Mashinostroenie, 1989. 240 s.
3. Kravchenko, P.S., Omarova, G.A. Modelirovanie i sravnenie razlichnyh transportnyh mikromodelej [Tekst] / P.S. Kravchenko, G.A. Omarova. – Problemy informatiki. 2017. № 3. S.5-15.
4. Kurc, V.V., Anufriev, I.E. Novye mikroskopicheskie modeli avtomobil'nogo trafika [Tekst] / V.V. Kurc, I.E. Anufrie. - Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2014. №4. S.50-56.
5. Panasyuk, YA.S. Agentnoe modelirovanie avtotransportnyh potokov [Tekst] / YA.S. Panasyuk, V.A. Malyh., V.A. Manujlov, I.K. Dudinov, G.M. Chernyak // Trudy 53-j nauchnoj konferencii MFTI. 2010. CH. 5. S. 130 – 131.
6. SHvecov, V.I. Matematicheskoe modelirovanie transportnyh potokov [Tekst] / V.I. SHvecov // Avtomatika i telemekhanika. – 2003. – №11. S.3-46.

Статья поступила в редколлегию 14.01.2020.

Рецензент: д-р. техн. наук, доц., Брянский государственный технический университет Захарова А.А.

Статья принята к публикации 02.02.2020.

#### Сведения об авторах:

Архангельский Анатолий Николаевич  
канд. техн. наук, доц.  
УНИТ, доцент кафедры «Автомобильный транспорт»  
Брянский государственный технический университет,

#### Information about authors:

Arkhangelsky Anatoly Nikolaevich  
candidate of technical sciences, associate professor,  
UNIT, Department of Road Transport, Associate  
Professor. Bryansk State Technical University