

УДК 629. 336

DOI: 10.46960/1810-210X_2020_4_101

А.А. Колин, С.Э. Силантьев, П.С. Рогов, С.А. Сергиевский

ПРИМЕНЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ И ТОПЛИВНО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты использования разработанной имитационной модели, позволяющей определить динамические и топливно-экономические свойства легкого коммерческого транспорта. Выполнено моделирование следующих режимов испытаний: разгон до 60 и 100 км/ч, разгон на 400 и 1000 м, разгон на высшей передаче со скорости 40 км/ч до 100 км/ч, 120 км/ч, выбег со скорости 50 км/ч. Проведена верификация разработанной модели путем анализа ее отклика на незначительное изменение исходных данных. Получены процентные значения влияния основных параметров (КПД трансмиссии, силы сопротивления воздуха, коэффициента качения колеса, массы) легкого коммерческого автомобиля на его динамические свойства. Выполнена расчетная оценка расхода топлива легким коммерческим автомобилем на постоянных скоростях движения. Проведено сравнение результатов натуральных испытаний (характеристики для оценки динамических характеристик автомобиля и для определения расхода топлива на постоянные скорости) и компьютерного моделирования. В дальнейших исследованиях предполагается использование верифицированной математической модели с целью анализа влияния значений передаточных чисел трансмиссии на расход топлива и выбросы вредных веществ легким коммерческим автомобилем в стандартизированных циклах движения.

Ключевые слова: режимы движения, расход топлива на постоянных скоростях, легкий коммерческий автомобиль, имитационная модель.

Введение

Учитывая постоянный рост стоимости топлива, большое значение приобретает оценка показателей топливной экономичности (ТЭ). Топливная экономичность – это совокупность свойств, определяющих расходы топлива при выполнении автомобилем транспортной работы в различных условиях эксплуатации. Она оценивается по путевому расходу топлива – расходу топлива (л/100км) на 100 км пути, проходимого автомобилем [1]. Затраты на топливо могут достигать более 30 % от стоимости затрат на эксплуатацию автомобиля. Поэтому показатель эксплуатационного расхода топлива является важнейшим для потребителей. Оценка расхода топлива становится основной задачей при проектировании или модернизации автомобиля. На стадии проектирования имеется возможность рассмотреть различные силовые установки, параметры трансмиссии и др. в зависимости от требуемых эксплуатационных качеств. Успешное решение данной задачи позволит существенно снизить материальные и финансовые затраты на стадии проектирования, а также повысить конкурентоспособность и поможет снизить стоимость владения транспортным средством

Цель работы – разработка имитационной модели для определения расхода топлива, оценка возможности ее применения путем сравнения результатов моделирования с результатами натуральных испытаний.

Проведенные ранее исследования [3-6] указывают на основные методы повышения топливной экономичности автомобиля. Это снижение аэродинамического сопротивления и сопротивления качению шин; оптимизация характеристик трансмиссии. Разработанная модель обязательно должна учитывать влияние выше изложенных параметров.

Методы расчета

Для моделирования движения автомобиля при постоянной скорости и при его разгоне использовались следующие подходы к математическому описанию движения.

Разгон автомобиля в режимах 0-60 км/ч, 0-100 км/ч, согласно [2] выполняется со 100 % подачей топлива и поэтому зависимость крутящего момента ДВС от его оборотов однозначно определяется этим условием. Неизвестным в данном случае является ускорение автомобиля. Для его определения используется следующее выражение, известное из теории автомобиля [1] (1):

$$a_a = \frac{(F_m - F_f - F_w)}{\delta m_a}, \quad (1)$$

где a_a – ускорение автомобиля, F_t – тяговая сила на ведущих колесах, F_f – сила сопротивления качению, F_w – сила сопротивления воздуха, δ – коэффициент учета вращающихся масс, m_a – масса автомобиля.

Тяговая сила определяется по формуле (2):

$$F_m = \frac{T_e u_{TP} \eta_{TP}}{r_k}, \quad (2)$$

где T_e – крутящий момент ДВС, u_{TP} – передаточное число трансмиссии, η_{TP} – КПД трансмиссии, r_k – радиус качения.

T_e в общем случае является функцией, зависящей от положения педали акселератора и скорости ДВС, или $T_e = f(d, \omega_e)$. В математической модели T_e представляет массив данных $T_{e,ij}$ $i, j = 1 \dots 17, j = 1 \dots 11$.

Сила сопротивления качению определяется как (3):

$$F_f = f m_a g, \quad (3)$$

где f – коэффициент сопротивления качению; g – ускорение свободного падения.

Сила сопротивления воздуха определяется следующим образом (4):

$$F_w = 0,5 \cdot C_x \cdot \rho_v \cdot A_v \cdot V^2, \quad (4)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, ρ_v – плотность воздуха, A_v – площадь поперечной проекции автомобиля, V – скорость автомобиля.

Коэффициент учета вращающихся масс определяется как (5):

$$\delta = 1 + \frac{I_e u_{TP}^2 \eta_{TP}}{m_a r_k^2} + \frac{I_{кп} u_{ГП}^2 \eta_{ГП}}{m_a r_k^2} + \frac{\sum I_k}{m_a r_k^2}, \quad (5)$$

где I_e – момент инерции ДВС, $I_{кп}$ – момент инерции карданной передачи, $u_{ГП}$ – передаточное число главной передачи, $\eta_{ГП}$ – КПД главной передачи, I_k – момент инерции колеса с полуосью (при наличии).

Поскольку $a_a = \frac{dV}{dt}$, определение времени разгона проводится путем интегрирования уравнения (1) по времени. При этом переключение передач выполняется при достижении номинальной скорости вращения ДВС. В процессе переключения передачи автомобиль сохраняет ранее набранную скорость. Это допустимо для принимаемого значения времени переключения. Определение начальной частоты вращения ДВС после переключения передачи проводится с учетом взаимосвязи скорости автомобиля и частоты вращения ДВС (6):

$$V = \frac{\omega_e r_k}{u_{mp}}, \quad (6)$$

Моделирование режима «выбег 50 – 0 км/ч» выполнялось с использованием уравнения (1) без тяговой силы на ведущих колесах и при измененном значении δ . Так как передача крутящего момента ДВС на колеса автомобиля при выбеге отсутствует, то при определении δ не учитывалось слагаемое, содержащее момент инерции ДВС.

При разгоне автомобиля в режиме движения с постоянной скоростью ускорение отсутствует. Неизвестным является крутящий момент ДВС и мгновенный расход топлива. Для определения неизвестных, выражение (1) приводится к следующему виду (7):

$$F_m = F_f + F_w + \delta m_a a_a, \quad (7)$$

Крутящий момент ДВС – T_e определялся с учетом (2) и текущей включенной передачи трансмиссии, определяемой с учетом (6). Удельный расход топлива в модели представляется с помощью массива данных g_{eij} и является функцией крутящего момента и частоты вращения ДВС $g_e = f(T_e, \omega_e)$. Поэтому для определения текущего удельного расхода топлива использовались полученные с учетом (2), (6), (7) значения T_e и ω_e . Далее, для определения суммарного расхода топлива, удельные значения расхода умножаются на время действия актуальных значений T_e и ω_e и далее суммируются.

Проверка модели

Объектом исследования в данной работе выступает продукция Группы ГАЗ. Основные параметры, задаваемые в модели, либо взяты из конструкторской документации, либо определены с помощью дополнительных расчетов. Созданную имитационную модель требовалось проверить. Основной целью проверки являлась проверка отклика программы на небольшие изменения ее параметров. Проверка заключалась в проведении серии расчетов с варьированием параметров модели в определенном небольшом диапазоне. В случае получения непропорционально сильного отклика на изменение исходных данных необходимым действием было бы дальнейшее совершенствование и корректировка модели. Перечень верификационных расчетов включал в себя разгон до 60 км/ч, разгон до 100 км/ч, разгон от 40 до 120 км/ч на 5 передаче трансмиссии, выбег 50-0 км/ч. Результаты проведенной предварительной верификации сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты предварительной верификации разработанной имитационной модели

Режим движения	Изменяемый параметр	Значение	Изменение, %	Результат модели	Изменение результата, %
Разгон 0-60 км/ч	Время переключения передач	0,5 с	0	8,68 с	0
		0,3 с	-40	8,08 с	- 6,9
		0,7 с	+40	9,21 с	6,1
	Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,41	0	8,68 с	0
		0,45	10	8,74 с	0,69
		0,37	-10	8,61 с	-0,81
	Площадь поперечной проекции автомобиля	5,72 м ²	0	8,68 с	0
		6,292 м ²	10	8,74 с	0,69
		5,148 м ²	-10	8,61 с	-0,81
	КПД карданной передачи	1	0	8,68 с	0
		0,98	-2	8,88 с	2,3
		0,97	-3	8,94 с	3
	КПД главной передачи	1	0	8,68 с	0
		0,98	-2	8,88 с	2,3
	Переключение передачи	3800 об/мин	0	8,68 с	0
4000 об/мин		5,26	8,61 с	-0,8	
3600 об/мин		-5,26	9,01 с	3,8	

Продолжение табл. 1

Режим движения	Изменяемый параметр	Значение	Изменение, %	Результат модели	Изменение результата, %	
Разгон 0-60 км/ч	Масса автомобиля	3065 кг	0	8,68 с	0	
		3500 кг	14,2	9,54 с	9,91	
	Коэффициент сопротивления качению	0,011	0	8,68 с	0	
		0,007	-36	8,54 с	-1,61	
		0,015	36	8,81 с	1,5	
	Разгон 0-100 км/ч	Время переключения передач	0,5 с	0	23,7 с	0
0,3 с			-40	22,73 с	- 4	
0,7 с			+40	24,62 с	3,9	
Коэффициент аэродинамического сопротивления		0,41	0	23,7 с	0	
		0,45	10	24,24 с	2,28	
		0,37	-10	23,2 с	-2,11	
Площадь поперечной проекции автомобиля		5,72 м ²	0	23,7 с	0	
		6,292 м ²	10	24,26 с	2,36	
		5,148 м ²	-10	23,19 с	-2,15	
КПД карданной передачи		1	0	23,7 с	0	
		0,98	-2	24,5 с	3,46	
		0,97	-3	24,8 с	4,81	
КПД главной передачи		1	0	23,7 с	0	
		0,98	-2	24,5 с	3,46	
Переключение передачи		3800 об/мин	0	23,7 с	0	
		4000 об/мин	5,26	24 с	1,22	
		3600 об/мин	-5,26	25,8 с	8,95	
Масса автомобиля		3065 кг	0	23,7 с	0	
		3500 кг	14,2	26,05 с	9,92	
Коэффициент сопротивления качению		0,011	0	23,7 с	0	
		0,007	-36	23 с	-3,04	
		0,015	36	24,9 с	5	
Разгон 40-120 км/ч		Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,41	0	47,18 с	0
			0,45	10	51,4 с	8,94
	0,37		-10	43,2 с	-8,44	
	Площадь поперечной проекции автомобиля	5,72 м ²	0	47,18 с	0	
		6,292 м ²	10	51,4 с	8,94	
		5,148 м ²	-10	43,2 с	-8,44	
	КПД карданной передачи	1	0	47,18 с	0	
		0,98	-2	49,19 с	4,26	
		0,97	-3	50,28 с	6,57	

Окончание табл. 1

Режим движения	Изменяемый параметр	Значение	Изменение, %	Результат модели	Изменение результата, %
Разгон 40-120 км/ч	КПД главной передачи	1	0	47,18 с	0
		0,99	-1	48,16 с	2,08
Выбег 50-0 км/ч	Коэффициент аэродинамического сопротивления	0,41	0	756 м	0
		0,45	10	739 м	-2,23
		0,37	-10	773 м	2,23
	Площадь поперечной проекции автомобиля	5,72 м ²	0	756 м	0
		6,292 м ²	10	739 м	-2,23
		5,148 м ²	-10	773 м	2,23
	Коэффициент сопротивления качению	0,011	0	756 м	0
		0,007	-36	1057 м	39,7
		0,015	36	591	-21,7
	Масса автомобиля	3065 кг	0	756 м	0
		3500 кг	14,2	767 м	1,46
		4000 кг	30,5	777 м	2,78

Полученные результаты показывают, что при небольшом изменении исходных данных наблюдается пропорциональный отклик модели. Снижению коэффициента аэродинамического сопротивления и площади поперечной проекции соответствует снижение времени разгона и наоборот. То же самое наблюдается при вариации КПД трансмиссии, времени переключения передач и коэффициента сопротивления качению. Влияние на результаты, компонент силы аэродинамического сопротивления становится более заметным при повышении скорости движения. Самое значительное влияние на результаты расчета при вариации коэффициента сопротивления качению наблюдается для режима движения «Выбег 50-0 км/ч». Одинаковое снижение значений КПД карданной передачи и КПД главной передачи вызывает одинаковое повышение времени разгона. При повышении массы автомобиля выбег и время разгона увеличиваются. Все перечисленные закономерности указывают на то, что разработанная имитационная модель адекватно реагирует на изменение исходных данных. Модель позволяет правильно исследовать качественные изменения объекта исследования.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов

С целью проверки разработанной имитационной модели, уточнения количественных значений ее результатов и уточнения некоторых исходных данных выполнялось сравнение результатов расчетов и натурных дорожных испытаний транспортных средств. Экспериментальные данные были получены на основании доступной информации по ранее проведенным дорожным испытаниям легкого коммерческого транспорта Группы ГАЗ, они не являются предметом настоящего исследования и подробно не приводятся.

В первую очередь, было выполнено сравнение и анализ результатов для режимов движения, позволяющих уточнить (в пределах 10 %) параметры, определяющие величину силы сопротивления движению. Это режимы «разгон до 60 км/ч», «разгон до 100 км/ч» «разгон на 400 м», «разгон на 1000 м», «разгон 40-100 км/ч» на 5 передаче трансмиссии, «разгон 40-120 км/ч» на 5 передаче трансмиссии, «выбег 50-0 км/ч». Режим «выбег 50-0 км/ч» использовался для уточнения коэффициента сопротивления качению и дополнительного контроля составляющих силы сопротивления воздуха. Режимы «разгон 40-120 км/ч» и «разгон

40-100 км/ч» использовались для уточнения коэффициента аэродинамического сопротивления. Режимы «разгон до 60 км/ч» и «разгон до 100 км/ч» позволили уточнить время переключения передач трансмиссии. После получения достоверных значений перечисленных выше параметров данные по всем режимам использовались для уточнения величины КПД агрегатов трансмиссии. Результаты сравнения расчетов и испытаний после уточнения исходных данных показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Сравнение результатов расчетов и испытаний
для режимов движения, характеризующих динамику транспортного средства**

<i>Режим движения</i>	<i>Результат моделирования</i>	<i>Результат испытаний</i>	<i>Разница результатов (%)</i>
Разгон 0 – 60 км/ч	8,61 с	9,1 с	5,38
Разгон 0 – 100 км/ч	21,81	21,2	-3,11
Разгон 40 – 100 км/ч на 5 передаче	25,66	27	4,96
Разгон 40 – 120 км/ч на 5 передаче	38,71	38,6	-0,28
Разгон на 400 м	22,06	22,5	1,96
Разгон на 1000 м	41,01	41,1	0,22
Выбег 50 – 0 км/ч	650	648	-0,31

Полученные результаты демонстрируют хорошее согласование расчета и эксперимента, а также подтверждают достоверность уточненных исходных данных. На окончательном этапе проверки модели выполнялось сравнение значений расходов топлива на постоянных скоростях движения. Сравнение результатов расчетов и эксперимента показано в табл. 3. Движение на всех скоростях выполнялось на 5-ой передаче трансмиссии.

Таблица 3

**Сравнение результатов расчетов и испытаний
по расходу топлива на постоянных скоростях движения**

<i>Скорость, км/ч</i>	<i>Результат испытаний л/100км</i>	<i>Результат моделирования, л/100км</i>	<i>Абсолютная разница результатов, л/100км</i>	<i>Разница результатов, %</i>
40	5,80	5,79	0,01	0,17
50	6,60	6,61	-0,01	-0,15
60	7,70	7,70	0,00	0,00
70	8,90	8,82	0,08	0,90
80	10,20	10,15	0,05	0,49
90	11,80	11,80	0,00	0,00
100	13,60	13,54	0,06	0,44
110	15,60	15,62	-0,02	-0,13
120	17,70	17,76	-0,06	-0,34

Относительная разница результатов расчетов и экспериментов не превышает 1 %. Это означает, что разработанная модель может быть использована для дальнейшей проработки мер по снижению расхода топлива на перспективных моделях легких коммерческих автомобилей.

Выводы

При небольшом изменении исходных данных наблюдается пропорциональный отклик модели. Качественное изменение результатов модели соответствует качественному изменению входных параметров. Снижению коэффициента аэродинамического сопротивления и площади поперечной проекции соответствует снижение времени разгона и наоборот. Аналогичная ситуация наблюдается при вариации КПД трансмиссии, времени переключения передач и коэффициента сопротивления качению. Влияние на результаты, компонент силы аэродинамического сопротивления становится более заметным при повышении скорости движения. Самое значительное влияние на результаты расчета при вариации коэффициента сопротивления качению наблюдается для режима движения «Выбег 50-0 км/ч».

Одинаковое снижение значений КПД карданной передачи и КПД главной передачи вызывает одинаковое повышение времени разгона. При повышении массы автомобиля выбег и время разгона увеличивается. Модель позволяет правильно исследовать качественные изменения объекта исследования. Полученные результаты (табл. 2) демонстрируют хорошее согласование расчета и эксперимента, а также подтверждают достоверность уточненных исходных данных. Относительная разница результатов расчетов и экспериментов не превышает 1 % (табл. 3). Это означает, что разработанная модель может быть использована для дальнейшей проработки мер по снижению расхода топлива на перспективных моделях легких коммерческих автомобилей.

В дальнейшем предстоит продолжить использовать разработанную имитационную модель для анализа влияния значений передаточных чисел трансмиссии на показатель топливной экономичности автомобиля.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства модельного ряда автомобилей ГАЗель Next с новой электронной архитектурой электронных систем» по Соглашению № 075-11-2019-027 от 29.11.2019 (постановление Правительства Российской Федерации от 09 апреля 2010 года № 218).

Библиографический список

1. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля / В.Н. Кравец. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2013. – 413 с.
2. ГОСТ Р 54810–2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. Москва, ФГУП Стандартинформ, 2012. 23 с.
3. **Огороднов, С.М.**, Оценка возможности использования аналитических методов при исследовании топливной экономичности автомобилей / С.М. Огороднов, А.Н. Тихомиров, С.И. Малеев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2015. – С. 10.
4. **Огороднов, С.М.**, Разработка расчетно-экспериментальной методики оценки расхода топлива при движении автомобиля по заданному маршруту / С.М. Огороднов, Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, С.И. Малеев. – 11 с.
5. **Блохин, А.Н.** Разработка методики поиска рациональных передаточных чисел трансмиссии с учетом эксплуатационных свойств и назначения автомобиля: дис. ...канд. тех. наук. Нижний Новгород, 2006. – 256 с.
6. **Валеев, Д.Х.**, Пути снижения расхода топлива грузовых автомобилей / Д.Х. Валеев, В.С. Карабцев // Механика машин, механизмов и материалов, 2014. – 7 с.

*Дата поступления
в редакцию: 23.09.2020*

A.A. Kolin, S.E. Silantiev, P.S. Rogov, S. A. Sergievsky

**APPLICATION OF A SIMULATION MODEL TO DETERMINE THE DYNAMIC
AND FUEL-ECONOMIC PROPERTIES OF THE CAR**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: Development of a simulation model for determining fuel consumption, evaluation of its application by comparing the simulation results with the results of field tests.

Design/methodology/approach: Development of a simulation model of light commercial vehicle traffic in various driving modes that are typical for determining the dynamic and fuel-economic properties of the vehicle under study. In addition, the calculated and experimental data were compared.

Findings: A good agreement was achieved between the obtained computer simulation data and the test results. This gives confidence in the developed simulation model.

Research limitations/implications: Lack of a detailed description of the mathematical model, test conditions, measurement methods, and processing of test results, which slightly reduces the value of research results.

Originality/value: Moreover, the percentage values of the influence of the main parameters such as transmission efficiency, air resistance, wheel rolling coefficient and weight of a light commercial vehicle on its dynamic properties were obtained.

Key words: driving modes, fuel consumption at constant speeds, light commercial vehicle, simulation model.