

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 629.33

DOI: 10.46960/1816-210X\_2021\_1\_62

В.В. Беляков, А.В. Тумасов, Д.А. Бутин, А.С. Вашурин

## АДЕКВАТНОСТЬ УПРАВЛЯЕМОСТИ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ЛЕГКОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты оценки адекватности имитационной модели легкого коммерческого автомобиля ГАЗ «ГАЗель NEXT», подтверждаемой сравнением результатов полигонных и расчетных исследований управляемости. Модель создана в программном пакете *MSC ADAMS/Car*. Для оценки использовалось сопоставление данных, полученных экспериментальным и расчетным путем. Испытание проводилось по методике «Fishhook» («Рыболовный крючок»), используемой *NHTS* для оценки устойчивости автомобилей. Погрешность результатов измерялась относительным и абсолютным значениями. При анализе отклонений бокового ускорения и скорости рыскания использовались средства математической статистики: среднее отклонение, дисперсия, среднеквадратичное отклонение. Незначительные отклонения и разброс свидетельствуют об адекватности имитационной модели и возможности ее использования для моделирования процессов криволинейного движения легких коммерческих автомобилей, а также оценки их управляемости и устойчивости.

*Ключевые слова:* имитационное моделирование, математическая модель, адекватность, верификация, легкий коммерческий автомобиль, управляемость, адекватность, точность.

Модели используются для частного исследования системы или для проверки ее реакции на внесение определенных изменений; они бывают различных типов: физические, аналоговые, математические. В технических науках популярны имитационные модели: логико-алгоритмическое описание поведения отдельных элементов системы и правил их взаимодействия, отображающих последовательность возникающих событий. Проверку адекватности модели необходимо проводить для оценки степени ее подобия, доказательство возможно только в результате сравнения расчетных и опытных данных [1]. Оценка адекватности на одном эксперименте не гарантирует ту же точность при других исследованиях или после внесения изменений, но дает косвенное представление о точности модели при подобных исследованиях. Таким образом, адекватность модели гарантирована в области в пространстве параметров, где погрешности модели остаются в допустимых пределах. Для подтверждения адекватности оценивается совпадение реакций модели с моделируемым объектом. При оценке реакций используют средние значения откликов и дисперсию отклонений откликов. Модель характеризуется областью адекватности – совокупностью ситуаций, в которых она адекватна. Точность модели характеризует рассогласованность соответствующего параметра модели и исследуемого объекта.

Объектом исследования и моделирования является автомобиль ГАЗ «ГАЗель NEXT» (модель A21R22 с полной массой 3 500 кг, с распределением между осями 1325 / 2175 кг). В снаряженном состоянии масса автомобиля равна 2 040 кг. Колесная база модели составляет 3145 мм, ширина колеи передней оси 1 750 мм, ширина колеи задней оси 1 560 мм. Шины: Cordiant Business 185/65R16C. Передняя подвеска – независимая на двойных поперечных рычагах со стабилизатором поперечной устойчивости. Задняя подвеска – зависимая на полуэллиптических рессорах с подрессорниками и стабилизатором поперечной устойчивости, оборудована телескопическими масляными амортизаторами. Трансмиссия – механическая с

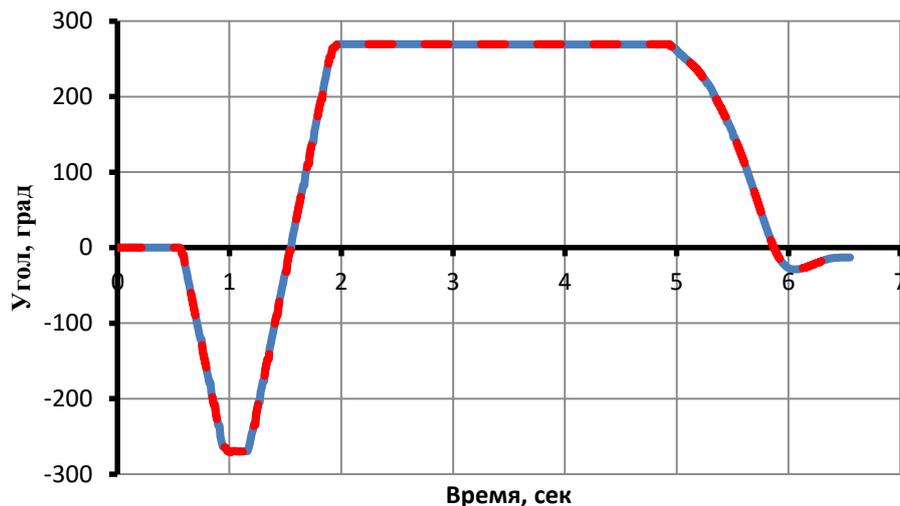
пятиступенчатой коробкой передач; привод на заднюю ось; дифференциал открытого типа; рулевое управление реечного типа.

Моделирование автомобиля осуществлялось в объектно-ориентированном программном пакете *MSC ADAMS Car*. Имитационная модель имеет подвижность по всем шести степеням свободы. В ней учитываются массо-инерционные характеристики подрессоренной и неподрессоренной массы, кинематика и эластокинематика подвески и рулевого управления, а также упругие и демпфирующие элементы. Модель шины создавалась на основании теории *Pacejca H.B.*, она учитывает вертикальную жесткость и демпфирование. Жесткость увода зависит от вертикальной нагрузки, продольного коэффициента скольжения и поперечного угла наклона шины относительно опорной поверхности. Характеристики шины исследовались при помощи дорожной лаборатории *Skid-trailer*. На данный момент такая методика исследования шин позволяет получить наиболее адекватные результаты за счет того, что контакт шины осуществляется с настоящим асфальтовым полотном. Осевые моменты инерции автомобиля относительно центра тяжести можно определить расчетно-аналитически, представив конструкцию транспортного средства как совокупность отдельных элементов: колеса, оси, кабина, рама, кузов, груз и др. Момент инерции отдельных элементов рассчитывался с помощью подробной CAD-модели.

Методика проведения и результаты полигонных испытаний исследуемого автомобиля представлена в [2-6]. Для изучения управляемости и реакций объекта исследования использовалось испытание «Fishhook» («Рыболовный крючок»), используемое *NHTSA* [7] при исследовании динамической устойчивости автомобиля к опрокидыванию. Для проведения этого испытания используется рулевой робот. Автоматизация при исследовании автомобиля значительно повышает достоверность и повторяемость результатов. Адекватность модели оценивалось по результатам одного заезда. Экспериментальные исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования НГТУ «Транспортные системы». Во время проведения испытаний фиксировались следующие параметры: угол поворота рулевого колеса, продольная скорость движения автомобиля, скорость рыскания, поперечное и продольное ускорение, а также перемещение центра тяжести в плоскости дороги. Для наглядности сравнения результатов полигонных испытаний и результатов расчета на рисунках изображены совмещенные графики. Результаты полигонных испытаний и моделирования совмещались во временной области по общей точке начала поворота рулевого колеса. Для анализа адекватности использовались относительные и абсолютные отклонения. Среднее относительно отклонения результатов расчета от эксперимента рассчитывалось (1):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{X_{\text{эксперимент}}^i - X_{\text{расчет}}^i}{X_{\text{эксперимент}}^i} \right) \quad (1)$$

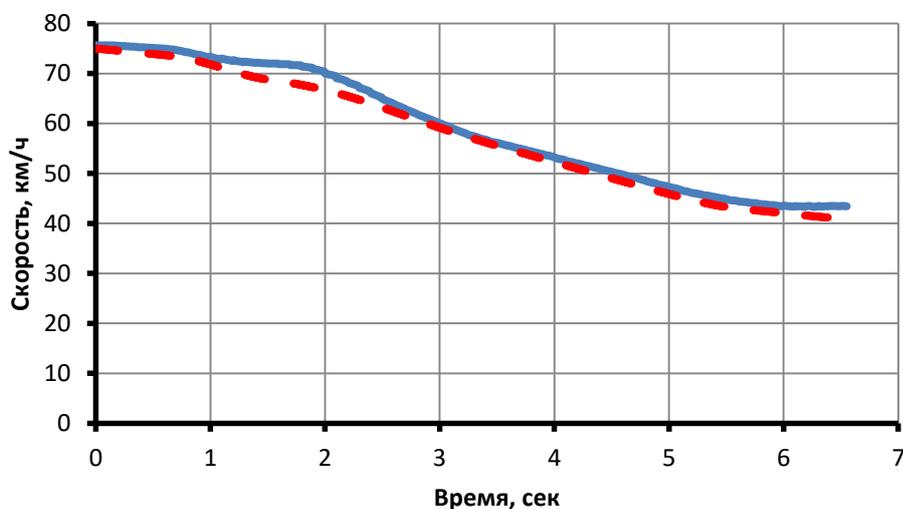
На рис. 1 представлены графики углов поворота рулевого колеса при эксперименте и моделировании, при котором использовалась зависимость поворота рулевого колеса из результатов полигонных исследований, поэтому графики не различаются. Поскольку у управляющей аппаратуры имеется определенная инертность, действительный процесс управления несколько отличается от заданного теоретического. Эта разница в управлении могла привести к очень большим различиям между результатами эксперимента и моделирования. В модели необходимо было учесть особенности приводов управляющих органов. Чтобы не усложнять модель, в качестве управляющего сигнала использовались регистрируемые при эксперименте данные. Таким образом, в модели учитывались особенности управляющих механизмов.



**Рис. 1. Угол поворота рулевого колеса**

— полигонные исследования, - - - моделирование

Скорость движения автомобиля во время эксперимента измерялась при помощи системы глобального позиционирования GPS с частотой 100 Гц. Она оказывает сильное влияние на реакцию автомобиля к повороту рулевого колеса. Можно сказать, что погрешность продольной скорости движения предопределяет точность всех других параметров, по которым оценивается погрешность управляемости модели. На рис. 2 представлены графики продольной скорости движения при эксперименте и моделировании.



**Рис. 2. Продольная скорость движения**

— полигонные исследования, - - - моделирование

Видно, что скорость движения при моделировании меньше, чем при эксперименте. Среднее отклонение продольной скорости движения модели 1,6 км/ч. Максимальное отклонение скорости движения 3,87 км/ч. Среднее относительное отклонение скорости модели 3 %, но не более 6 %. На рис. 3 представлены графики скорости рыскания. Она является одним из важных показателей оценки управляемости автомобиля: по ней можно судить об управляемости и поворачиваемости автомобиля, оценивать устойчивость управляемости.

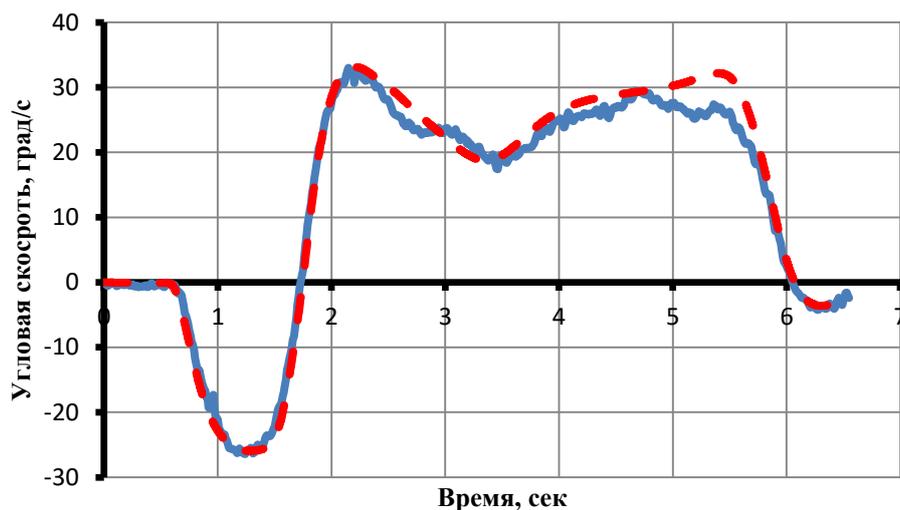


Рис. 3. Скорость рыскания

— полигонные исследования, — — — моделирование

Среднее относительное отклонение скорости рыскания 6 %. Разница скоростей рыскания при моделировании и испытании непостоянна, ее можно представить в виде распределения (рис. 4). Из гистограммы видно, что распределение отклонений имеет нормальное распределение. Абсолютное среднее отклонение скоростей рыскания  $-1,0234$  рад/с. Дисперсия разницы отклонения скорости рыскания  $D=4,464$  мм<sup>2</sup>/с<sup>4</sup>, среднее квадратичное отклонение  $\sigma=2,11$  мм/с<sup>2</sup>. Максимальное отклонение скорости рыскания 7,05 град/с.

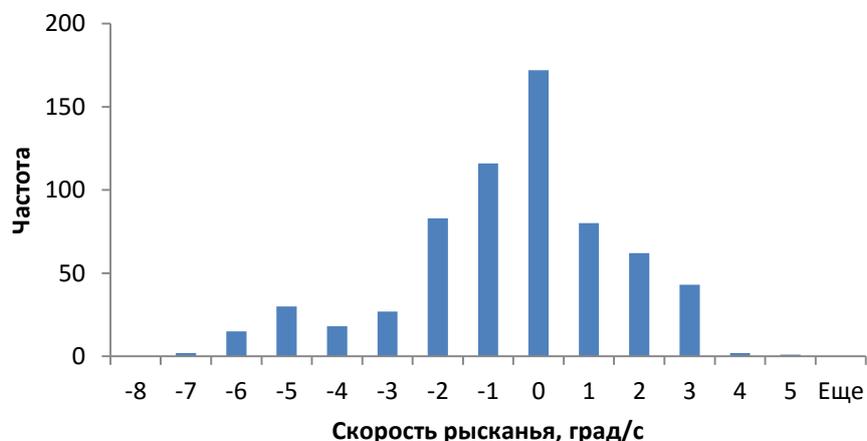
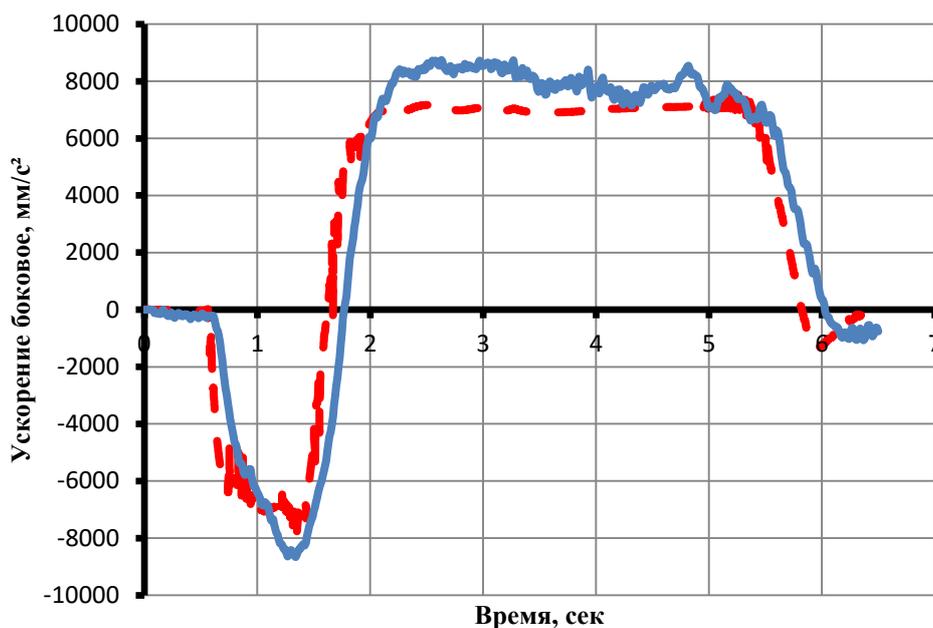


Рис. 4. Распределение отклонений скорости рыскания

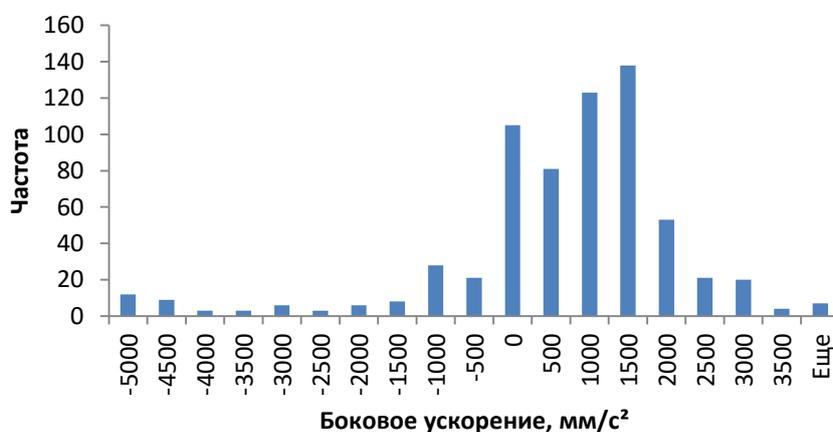
На рис. 5 представлены графики бокового ускорения. Максимальное боковое ускорение, развиваемое автомобилем, важно с точки зрения активной безопасности. Фактически этот параметр обозначает максимально возможную динамику ухода транспортного средства от столкновения. Из графиков видно, что боковое ускорение при моделировании меньше, чем при эксперименте.



**Рис. 5. Боковое ускорение**

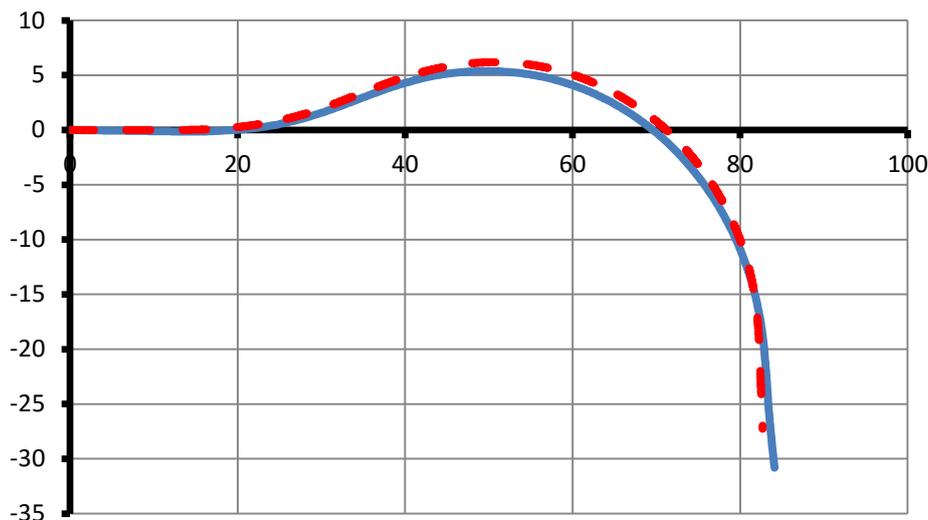
— полигонные исследования, - - - моделирование

Среднее относительное отклонение боковых ускорений 7 %. Разницу боковых ускорений можно представить в виде распределения рис. 6. Среднее отклонение боковых ускорений 391,92 мм/с<sup>2</sup>. Дисперсия отклонений бокового ускорения  $D = 2483002$  мм<sup>2</sup>/с<sup>4</sup>, среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 1575,7$  мм/с<sup>2</sup>. Максимальное отклонение бокового ускорения 5814 мм/с<sup>2</sup>.



**Рис. 6. Распределение отклонений боковых ускорений**

Из-за проведения исследований в различных системах координат для расчета погрешности траекторий требуются некоторые преобразования для их совмещения. Для совмещения траекторий они перемещались и поворачивались таким образом, чтобы начальные условия движения совпадали. Прямолинейное движение автомобиля в начале испытания принимается за общую ось, а время начала поворота рулевого колеса определяет общую точку траекторий. Совмещенные траектории движения центра тяжести автомобиля на полигонных исследованиях и при имитационном моделировании представлены на рис. 7.



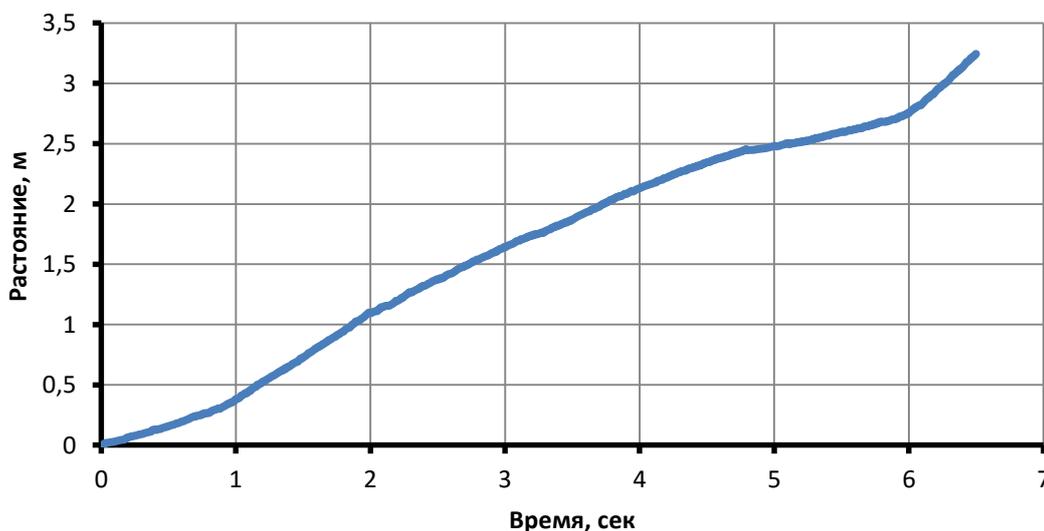
**Рис. 7. Траектории движения ЦТ**

— полигонные исследования, - - - моделирование

Разница траекторий – это расстояние между положением центров тяжести модели и реального автомобиля во время испытания в одинаковый момент времени, рассчитываемое по формуле (2):

$$\Delta^t = \sqrt{(X_{\text{расчет}}^t - X_{\text{эксперимент}}^t)^2 + (Y_{\text{расчет}}^t - Y_{\text{эксперимент}}^t)^2} \quad (2)$$

Зависимость изменения расстояния между центрами тяжести от времени представлена в виде графика на рис. 8.



**Рис. 8. Отклонение траектории**

Максимальное отклонение траекторий в конце испытания составило 3,24 м, при этом общий пройденный путь во время испытания равен 106,93 м. Относительное отклонение траектории от пути составляет 3 % или 0,03 м/м.

### Выводы

Выполнена проверка адекватности имитационной математической модели путем сравнения результатов натурального эксперимента и моделирования. Адекватность и точность модели оценивалась по результатам испытания «Fishhook». Оценка проводилась по параметрам, характеризующим управляемость и устойчивость движения: продольная скорость движения, скорость рыскания, боковое ускорение, траектория движения. Сравнение результатов эксперимента и имитационного моделирования доказывает адекватность модели. Расхождение результатов и отклонение средних значений не превышает 10 %. Абсолютное отклонение продольной скорости движения не превысило 6 %, а траектории – 3 %. Среднее значение отклонений: бокового ускорения 7 %, скорости рыскания 6 %. Среднее отклонение скорости рыскания -1,0234 град/с, а бокового ускорения – 391,92 мм/с<sup>2</sup>. Среднеквадратическое отклонение скорости рыскания 2,11 мм/с<sup>2</sup>, а бокового ускорения – 1575,7 мм/с<sup>2</sup>. Небольшие отклонения и разброс свидетельствуют об адекватности имитационной модели и возможности ее использования для моделирования процессов криволинейного движения легких коммерческих автомобилей, оценки их свойств управляемости и устойчивости.

### Библиографический список

1. **Скотников, Г.И.** Проверка адекватности математической модели криволинейного движения автотрассы / Г.И. Скотников // Известия вузов. Машиностроение. – 2016. – №8 (677). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proverka-adekvatnosti-matematicheskoy-modeli-krivolineynogo-dvizheniya-avtopoezda> (дата обращения: 03.12.2020).
2. **Торопов, Е.И.** Проведение натуральных испытаний для отладки программно-аппаратного комплекса для оценки управляемости легких коммерческих автомобилей, оснащенных системами электронными контроля устойчивости. Особенности выполнения маневров на сухом и влажном асфальте / Е.И. Торопов, Ю.П. Трусов, П.С. Мошков, А.А. Аникин, А.С. Вашурин, Ю.И. Палутин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2017. – №4 (119). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/provedenie-naturnyh-ispytaniy-dlya-otladki-programmno-apparatnogo-kompleksa-dlya-otsenki-upravlyaemosti-legkih-kommercheskih> (дата обращения: 30.11.2020).
3. **Вашурин, А.С.** Исследование влияния электронной системы динамической стабилизации легкого коммерческого автомобиля на безопасность криволинейного движения / А.С. Вашурин, П.С. Мошков, Ю.П. Трусов, Е.И. Торопов, А.В. Тумасов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 12-4. – С. 665-670; URL: <http://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39601> (дата обращения: 30.11.2020).
4. **Groshev, A.** Estimation of light commercial vehicles dynamics by means of HIL-testbench simulation / A. Groshev, A. Tumasov, E. Toropov, P. Sereda // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – №315(1). – 2018. – DOI: 10.1088/1757-899X/315/1/012010.
5. **Tumasov, A.** Estimation of Influence of ESP on LCV / A. Tumasov, A. Vashurin, E. Toropov, Yu. Trusov, P. Moshkov // Active Safety in Condition of Curvilinear Movement. 118-123. DOI:10.5220/0005894401180123. 2016.
6. **Торопов, Е.И.** Верификация методики виртуально-физических исследований динамики криволинейного движения автомобилей по результатам дорожных испытаний / Е.И. Торопов, А.С. Вашурин, А.В. Тумасов, А.А. Васильев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2019. – №2 (125). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/verifikatsiya-metodiki-virtualno-fizicheskikh-issledovanii-dinamiki-krivolinei-nogo-dvizheniya-avtomobilei-po-rezultatam-dorozhnyh> (дата обращения: 30.11.2020).
7. Federal Motor Vehicle Safety Standards; Electronic Stability Control Systems; Controls and Displays // National Highway Traffic Safety Administration URL: <https://www.nhtsa.gov/fmvss/federal-motor-vehicle-safety-standards-electronic-stability-control-systems-0> (дата обращения: 03.12.2020).

*Дата поступления  
в редакцию: 11.01.2021*

---

V.V. Belyakov, A.V. Tumasov, D.A. Butin, A.S. Vashurin

## ADEQUACY SIMULATION MODEL OF A LIGHT COMMERCIAL CAR

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

The article presents the results of assessing the adequacy of the simulation model of the light commercial vehicle GAZ GAZelle NEXT. The adequacy of the model is confirmed by comparing the results of polygon and calculated controllability studies. The model was created in the MSC ADAMS / Car software package. It takes into account the mass-inertial characteristics of the sprung and unsprung masses, the suspension model takes into account the kinematics and elasto-kinematics of the suspension and steering, as well as stiffness and damping elements. The tire model takes into account the vertical stiffness and damping, the slip stiffness depends on the vertical load, the longitudinal slip coefficient and the lateral angle of inclination of the tire relative to the ground. The assessment was carried out by comparing the data obtained experimentally and by calculation. The test was conducted using the "Fishhook" method used by NHTS to assess vehicle stability. To estimate the error of the results, relative and absolute measurements of the error were used. When analyzing the lateral acceleration and yaw rate deviations, the means of mathematical statistics were used: mean deviation, variance, standard deviation. The discrepancy between the results and the deviation of the mean values does not exceed - 10%. Small deviations and scatter indicate the adequacy of the simulation model and the possibility of its use for modeling the curvilinear motion of light commercial vehicles and assessing their properties of handling and stability.

**Key words:** simulation, mathematical model, adequacy, verification, light commercial vehicle, LCV, handling, adequacy, accuracy.