

УДК 629.113

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДОРОЖНЫХ ИСПЫТАНИЙ УПРАВЛЯЕМОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ АВТОБУСА

С.Ю. Костин, асп. / В.Н. Кравец, д.т.н., проф. / Р.А. Мусарский, д.т.н., проф.
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее актуальной является проблема использования и совершенствования транспортных интеллектуальных систем активной безопасности, направленных на минимизацию ошибок, допускаемых водителем. К наиболее распространенным названным системам относят системы электронного контроля устойчивости (ЭКУ), препятствующие возникновению заносов и опрокидываний транспортных средств (ТС). В настоящее время оценка свойств активной безопасности, в том числе и при сертификации, проводится по результатам дорожных испытаний. В то же время на этапе проектирования довольно часто возникает необходимость анализа различных вариантов конструкций ТС и выбора наиболее рационального решения, обеспечивающего их оптимальные параметры. При этом с целью сокращения материальных и временных затрат целесообразно применение компьютерного моделирования для оценки свойств активной безопасности.

Необходимо отметить, что новая редакция Правил ЕЭК ООН № 13 (Пересмотр 6, Поправка 1) предусматривает регламентацию особых требований к ТС, оснащённым системой обеспечения их устойчивости (Добавление 12, Приложение 21). В соответствии с текстом документа, эффективность функции контроля траектории движения и/или устойчивости к опрокидыванию механических ТС и прицепов (ТС категорий М, N и O) может быть определена при помощи компьютерного моделирования, которое рассматривают как альтернативу динамическому маневрированию ТС. При этом аттестация применяемых средств моделирования должна быть осуществлена на основе сопоставлений результатов расчетов с данными, полученными при реальных испытаниях ТС.

Более того, компьютерное моделирование позволяет проводить оценку наиболее важных и интересных, с точки зрения научного и практического подхода, критических режимов движения ТС.

При натуральных испытаниях автобуса выявляют предельную скорость, позволяющую осуществлять поворот с радиусом 35 м. Дальнейшее увеличение скорости не позволяет осуществлять движение по заданной траектории из-за скольжения колёс. Однако натурные испытания не позволяют выявить, как и в каком порядке колёса начинают скользить. Полную картину скольжения колёс при достижении критической скорости можно получить при моделировании входа в поворот на пространственной математической модели автобуса, представленной на рис. 1.

Целью работы является выявление предельно допустимых скоростей движения автобуса на типовых траекториях.

Постановка задачи. Произвести компьютерное моделирование движения автобуса на типовых траекториях и сравнить результаты моделирования с результатами дорожных испытаний.

Работа выполнена в рамках поисковой НИР, финансируемой из средств Федеральной целевой

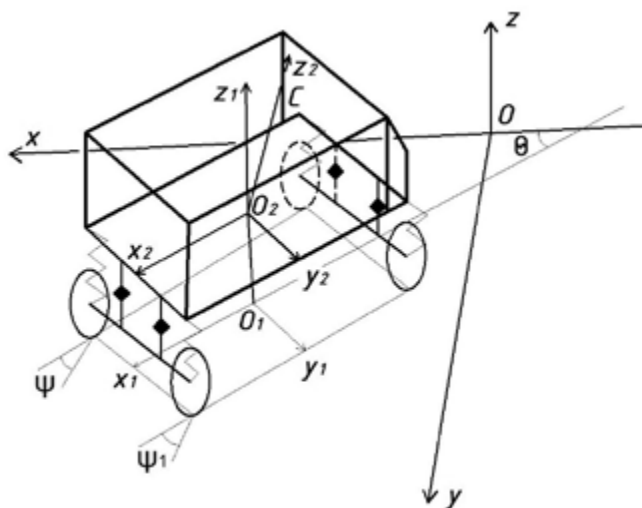


Рисунок 1. Математическая модель автобуса

программы Министерства образования и науки РФ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.».

Компьютерное моделирование. Системы координат. Для вывода уравнений движения были введены системы координат: неподвижная и несколько подвижных [1, 2]. Введены следующие обобщенные координаты, однозначно определяющие состояние системы: x, y, z — декартовы координаты точки O_2 ; α, β — углы продольного и поперечного крена кузова; θ — угол между продольной осью автобуса O_x и осью O_1x_1 (курсовой угол); z_i — расстояние от центра i -го колеса до опорной поверхности; γ — угол, который образует продольная главная ось эллипсоида инерции кузова с плоскостью $O_2x_2y_2$; ψ — угол поворота правого переднего колеса.

Взаимодействие колес с опорной поверхностью. Для описания взаимодействия колес с опорной поверхностью сделано предположение, что на колеса установлены пневматические шины, обладающие свойствами бокового увода и продольного псевдоскольжения (крипа) [2].

Нелинейная зависимость силы боковой силы F_y от угла увода $\delta = u/v$ (где u и v — поперечная и продольная составляющие скорости центра i -го колеса) была аппроксимирована выражением:

$$F_y = -K_y \delta \frac{\phi F_z}{\sqrt{(\phi F_z)^2 + (K_y \delta)^2}}$$

где K_y — коэффициент сопротивления уводу на линейном участке зависимости $F_y = f(\delta)$; δ — угол увода; ϕ — коэффициент сцепления колеса с опорной поверхностью; F_z — нормальная сила, действующая на колесо.

При малых значениях угла увода эта зависимость аппроксимирует линейный увод $F_y = -K_y \delta$, а при больших значениях увода эта зависимость аппроксимирует переход от качения эластичного колеса к скольжению. При этом предельное значение боковой силы равно $F_{y_{max}} = \phi F_z$.

Уравнения движения. Уравнения движения получены на основе уравнений Лагранжа второго рода [1, 2].

Уравнение по вертикальной координате z центра поддресоренной массы:

$$m\ddot{z} + mg + \sum_{i=1}^4 R_i = 0$$

уравнение по углу α продольного крена

$$B_1 \ddot{\alpha} = B_1 \beta \ddot{\theta} + (mh^2 + B_1 - A) \dot{\beta} \dot{\theta} + A_1 \alpha \dot{\theta}^2 + A \gamma \dot{\theta}^2 - mgh \alpha - mh(V_1 - u \dot{\theta}) + a_1(R_1 + R_2) - a_2(R_3 + R_4)$$

уравнение по углу β поперечного крена

$$A_1 \ddot{\beta} + \beta[mh^2 \alpha - A(\alpha + \gamma)] \dot{\alpha} \dot{\theta} (mh^2 - A + B_1) - B_1 \beta \dot{\theta}^2 + mh(\dot{u} + v \dot{\theta}) + mg h \beta + b(R_1 - R_2 + R_3 - R_4) = 0$$

уравнение по курсовому углу θ :

$$[C + mh^2 \alpha^2 + B_1 \beta^2 + A(\alpha + \gamma)^2] \ddot{\theta} = \Pi_4 - \dot{\alpha} \dot{\theta} [2mh^2 \alpha + A(\alpha + \gamma)] - 2B_1 \beta \dot{\theta} + (A + B) \dot{\alpha} \dot{\beta} - mh(\alpha \dot{u} - \beta \dot{v} + \alpha v \dot{\theta} + \beta \dot{u}) + B_1 \dot{\alpha} \dot{\beta} - \beta [mh^2 \alpha - A(\alpha + \gamma)]$$

уравнение поперечного перемещения со скоростью u :

$$m\dot{u} + mV\dot{\theta} + mh(\dot{\beta} + 2\dot{\alpha}\dot{\theta} + \alpha\ddot{\theta} - \beta\dot{\theta}^2) = \Pi_5$$

В приведённых формулах приняты следующие обозначения: m — поддресоренная масса; g — ускорение свободного падения; γ — угол наклона эллипсоида инерции в продольном направлении; h — расстояние от центра поддресоренной массы до плоскости, проходящей через верхние точки крепления подвесок; A, B, C — главные центральные моменты инерции поддресоренной массы относительно осей соответственно ($A_1 = A + mh^2, B_1 = B + mh^2$); R_i — силы со стороны подвесок на поддресоренную массу; соответствующие обобщённые силы по координатам θ и u .

Результаты моделирования входа в поворот. Приведём результаты моделирования входа в поворот при скорости движения, приближающейся к критической (рис. 2).

На рис. 2 представлена траектория входа в поворот при скорости 14,5 м/с чуть меньше критической, равной 15,14 м/с = 54,05 км/ч. Угол поворота управляемых колёс 0,24 радиана. Левые колёса внутренние по отношению к центру поворота. Наблюдаются шесть

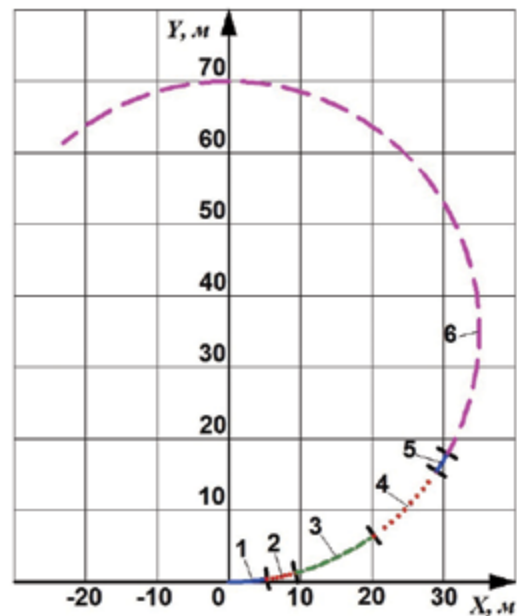


Рисунок 2. Траектория входа в поворот со скольжением

последовательных участков с различным скольжением колёс автобуса:

- участок 1. (от $x = 0$ и $y = 0$ до $x = 4.35$ м и $y = 0.65$ м) скользят оба передних колеса;
- участок 2. (от $x = 4.35$ м и $y = 0.65$ м до $x = 8.66$ м и $y = 1.29$ м) скользят все колёса;
- участок 3. (от $x = 8.66$ м и $y = 1.29$ м до $x = 23.49$ м и $y = 10.28$ м) скользят передние и попеременно (то одно - то другое) заднее правое и заднее левое;
- участок 4. (от $x = 23.49$ м и $y = 10.28$ м до $x = 28.65$ м и $y = 17.38$ м) скользят передние и попеременно (то скользит-то не скользит) заднее левое;

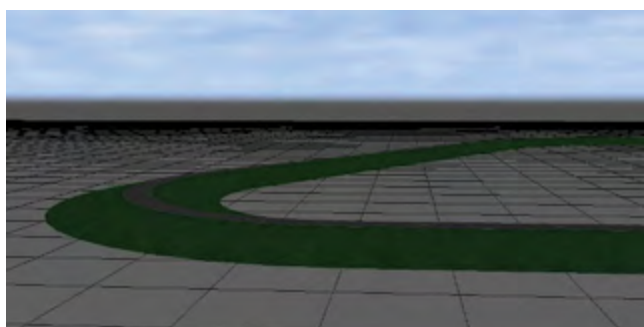


Рисунок 3. Моделируемая траектория движения автобуса



Рисунок 4. Виртуальная модель автобуса

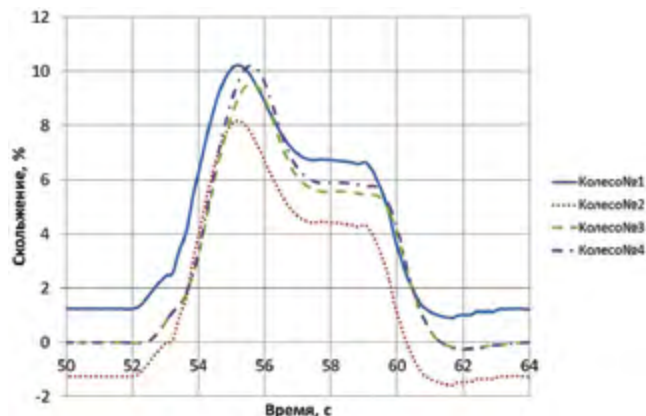


Рисунок 5. Скольжение колёс при входе в поворот

- участок 5. (от $x = 28.65$ м и $y = 17.38$ м до $x = 30.83$ м и $y = 42.96$ м) скользят переднее правое и попеременно переднее левое и заднее левое;
- участок 6. (от $x = 30.83$ м и $y = 42.96$ м до конца поворота) скользят переднее левое и заднее левое.

При превышении критической скорости 15,14 м/с = 54,05 км/ч автобус в поворот не вписывается.

Здесь можно выделить два основных участка:

- участок а) (от $x = 0$ и $y = 0$ до $x = 4.55$ м и $y = 0.66$ м) скользят оба передних колеса;
- участок б) (от $x = 4.55$ м и $y = 0.66$ м и до конца поворота) скользят все колёса.

Результаты моделирования с помощью SDK-Simulation. В настоящее время существует большое количество компьютерных программ, позволяющих имитировать различные условия движения автомобиля и воспроизводить алгоритмы работы интеллектуальных систем активной безопасности. Одной из таких программ является SDK-Simulation, используемая в практике научно-исследовательского центра компании Кнорр-Бремзе (Будапешт, Венгрия). Данная программа обладает значительными возможностями и обеспечивает высокоточное моделирование условий движения различных категорий ТС [3...5].

Для имитации условий движения при испытании «поворот» в соответствии с требованиями нормативного документа был разработан виртуальный участок дорожной поверхности (рис. 3).

Создана виртуальная модель автобуса ПАЗ (рис. 4). Заданы соответствующие параметры водителя и программа управляющего воздействия. Для оценки скольжения в критических режимах движения на рис. 5 представлены результаты компьютерного моделирования. Схема расположения колёс автобуса представлена на рис. 6.

Для проверки адекватности и работоспособности разработанных компьютерных моделей был проведен ряд натурных исследований. В качестве базового было выбрано испытание «поворот» по ГОСТ 523022004. Исследования выполнены сотрудниками

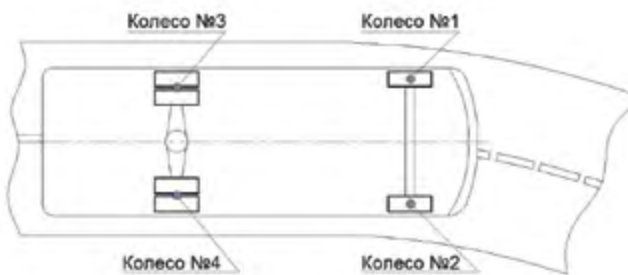


Рисунок 6. Схема расположения колёс автобуса



Рисунок 7. Автобус ПА3-4234-05



Рисунок 8. Траектория движения автобуса на полигоне



Рисунок 9. Блок сбора данных системы RaceLogic



Рисунок 10. Схема установки антенн на крыше автобуса

Автомобильного института НГТУ при поддержке Испытательной лаборатории НГТУ и «Группы ГАЗ». Объектом исследования являлся автобус ПА34234-05 (рис. 7). Дорожные испытания проводились на автополигоне ГАЗ (рис. 8).

Для определения параметров движения автобуса использовалась современная измерительная система RaceLogic VB20SL3 20Hz GPS Data Logger With Slip,

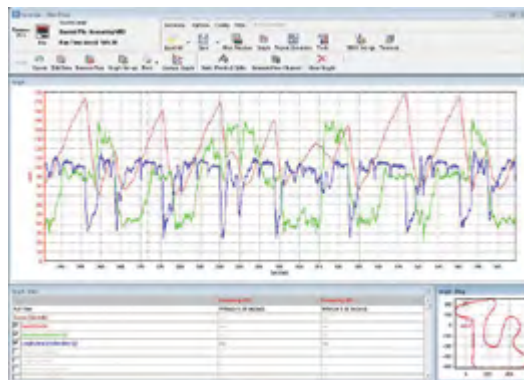


Рисунок 11. Интерфейс программного обеспечения RaceLogic

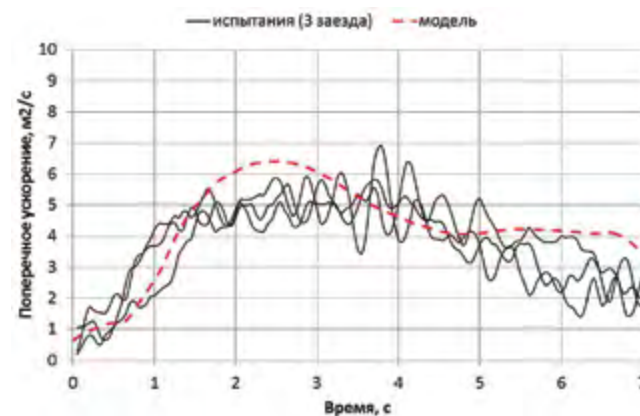
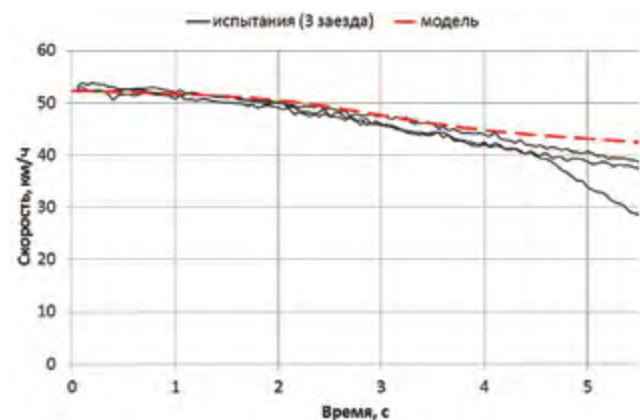


Рисунок 12. Сравнение результатов моделирования и натуральных испытаний

Pitch and Roll Angle (рис. 9). Принцип работы системы основан на использовании GPS технологий. На крышу автобуса устанавливаются магнитные антенны (рис. 10), которые обеспечивают связь со спутником и позволяют фиксировать скорость ТС, ускорения по двум осям, траекторию движения, угол крена и угловую скорость поворота (рис. 11).

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

На рис. 12 а, б дано сравнение результатов моделирования и натуральных испытаний. Сплошными линиями показаны данные, зафиксированные в ходе дорожных испытаний, пунктирными — данные компьютерного моделирования. Из рисунков следует, что отличие не превосходит 10 % при сравнении скоростей движения и 15% при сравнении поперечных ускорений, что свидетельствует о хорошей сходимости результатов компьютерного моделирования и дорожных испытаний.

ВЫВОДЫ

1. При дорожных испытаниях автобуса выявлена предельная скорость, позволяющая осуществлять поворот с радиусом 35 м. Дальнейшее увеличение скорости не позволяет осуществить движение по заданной траектории из-за скольжения колёс.
2. Дорожные испытания не позволяют выявить, как и в каком порядке колёса автобуса начинают скользить. Полную картину скольжения колёс при достижении критической скорости позволяет осуществить моделирование входа в поворот на пространственной математической модели.
3. С помощью программного пакета SDK-Simulation выполнена имитация испытания «поворот» в соответствии с требованиями нормативного документа и разработан виртуальный участок дорожной поверхности. Создана виртуальная модель автобуса ПАЗ 4234-05, заданы параметры водителя и программа управляющего воздействия.
4. Сравнение результатов компьютерного моделирования и дорожных испытаний автобуса показало достаточно хорошую сходимость, что свидетельствует об адекватности разработанной пространственной модели.
5. Разработанная имитационная модель автобуса и результаты исследований могут быть использованы при разработке методики оценки свойств активной безопасности ТС по результатам имитационного моделирования, которая имеет важное практическое значение на этапах проектирования и доводки автомобилей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Журавлев В.Ф., Фурасев Н.М. Механика систем с неустойчивыми связями. М.: Наука, 1993. 240 с.
2. Мусарский Р.А. Математические модели колёсных экипажей: учебное пособие / ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород, 2008. 163 с.
3. Костин С.Ю., Грошев А.М., Дыгало В.Г., Тумасов А.В. Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования // Журнал ААИ № 2, 2011. С. 34-37.
4. Тумасов, А.В., Костин С.Ю., Колтунов В.А. Исследование свойств активной безопасности автобуса среднего класса методом имитационного моделирования // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. — Нижний Новгород. № 1 (94), 2012. С.134-142.
5. Кравец В.Н., Селифонов В.В. Теория автомобиля: учебник для вузов. М.: ООО «Гринлайт+», 2011. — 884 с.