

МОБИЛЬНЫЕ РОБОТЫ И МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ



Материалы научной школы-конференции Часть 2

Москва, 21-25 марта 2005 года

Москва 2005

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ «ЭЙЛЕР» И СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТОВ С НАТУРНЫМИ ИСПЫТАНИЯМИ

Бойков В.Г.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия,

E-mail: boykov@euler.ru

Представлены основные возможности и некоторые результаты моделирования движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем ЭЙЛЕР (EULER). Дано сравнение результатов математического моделирования с результатами натурных испытаний.

1. Основные возможности программного комплекса ЭЙЛЕР по моделированию движения автомобиля

Программный комплекс автоматизированного динамического анализа многокомпонентных механических систем ЭЙЛЕР (EULER) представляет собой универсальную технологию для математического моделирования движения механических систем в трехмерном пространстве. Основные особенности программного комплекса заключаются в следующем:

- автоматическая генерация уравнений движения исследуемых механических систем по их инженерному описанию.
- моделирование механических систем с учетом больших перемещений в нелинейной постановке.
- современный пользовательский интерфейс, который позволяет оперативно получать визуальную картину движения механической системы параллельно с ее характеристиками в виде графиков и числовых значений.

Программный комплекс успешно используется при проведении научных и прикладных исследований в авиации, ракетно-космической технике, станкостроении, автомобилестроении и в других областях техники. В автомобильной технике программный комплекс может использоваться для решения самых различных задач, в частности:

- исследование вопросов устойчивости и управляемости автомобиля при выполнении маневров «поворот», «переставка», «рывок руля», «выход из круга» и т.д.;
- исследование плавности хода автомобиля при езде по различным дорогам;
- исследование тормозных свойств автомобиля;
- исследование нагружения трансмиссии автомобиля в различных условиях движения;
- моделирование работы различных узлов и агрегатов автомобиля, включая механизмы двигателя, подвески колес, открывания капота и т.д.

Благодаря универсальности используемой технологии в программном комплексе можно проводить детальные исследования автомобилей с любыми типами подвески, трансмиссии, схемами поворота управляемых колес. Общая схема автомобиля также может быть произвольной, включая сочлененные и многоосные автомобили, автомобили с прицепами.

2. Модель автомобиля УАЗ-3151

В качестве примера рассмотрим модель автомобиля УАЗ-3151, которая использовалась для исследования устойчивости и управляемости при выполнении маневров. Кузов автомобиля, включая раму, двигатель, полезную нагрузку и экипаж, считается в данной модели единым твердым телом. Динамическая модель кузова состоит из геометрической и массово-инерционной моделей, которые представлены на рис. 1. Геометрическая модель служит только для отображения внешнего вида. Массово-инерционная модель используется для определения центра масс и тензора инерции.

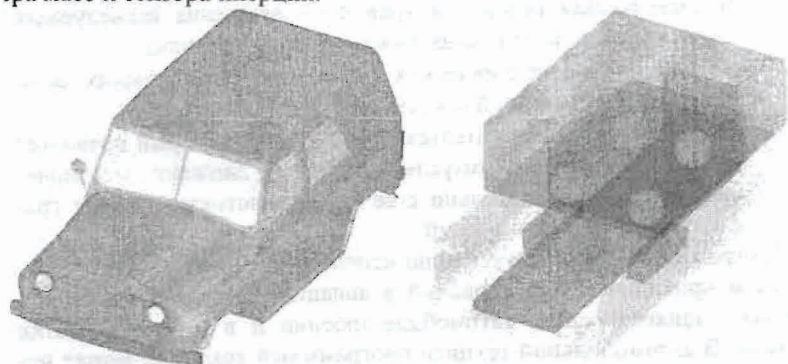


Рис. 1. Геометрическая и массово-инерционная модели кузова

Кроме кузова модель автомобиля включает следующие звенья (твердые тела): четыре колеса, балка моста передней подвески, поворотные ступицы передних колес, балка моста задней подвески, звенья рулевого механизма. Звенья соединены шарнирами и силовыми элементами. Силовые элементы используются для моделирования рессор, амортизаторов, отбойников, аэродинамического воздействия на кузов. Взаимодействие колеса с дорогой моделируется специальным элементом «колесо с эластичной шиной», который имеется в программном комплексе. Внешний вид модели передней подвески с механизмом рулевого управления представлен на рис. 2.

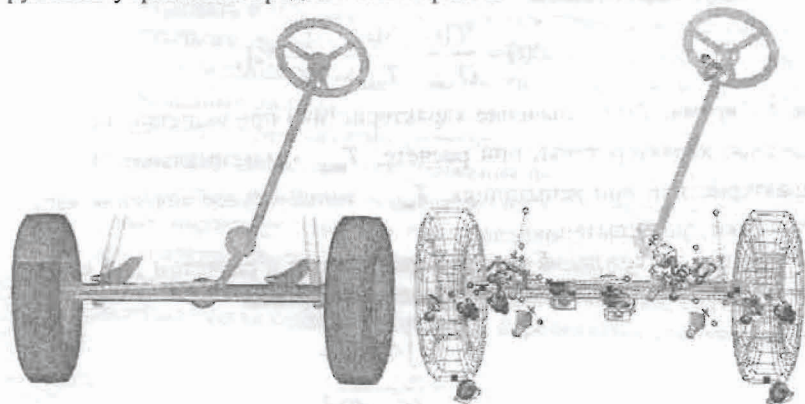


Рис. 2. Модель передней подвески автомобиля УАЗ-3151

2. Сравнение расчетов с натурными испытаниями

Результаты расчетов автомобиля УАЗ-3151 сравнивались с результатами натурных испытаний, которые проводились в 21 научно-исследовательском испытательном институте МО РФ. Испытания автомобиля проводились при выполнении маневра «переставка» в соответствии со стандартом [1]. При испытаниях измерялись пять характеристик движения автомобиля:

- α – угол поворота управляемых колес;
- W_z – угловая скорость автомобиля вокруг вертикальной оси;
- β_x – угол бокового крена автомобиля;
- A_{y1}, A_{y2} – поперечные ускорения над осью передних и задних колес.

Для проверки соответствия разработанной модели и реального автомобиля были проведены расчеты движения автомобиля при таком управлении рулем по времени, которое полностью соответствует углу поворота управляемых колес, полученному в испытаниях. При этом автомобиль при расчете модели несколько вышел за пределы разметки

заданной полосы движения. Для ликвидации выхода автомобиля за пределы разметки была произведена пропорциональная коррекция графика угла поворота управляемых колес, полученного в испытаниях. Следует отметить, что требуемая коррекция не оказала существенного влияния на другие характеристики движения автомобиля, которые измерялись в испытаниях и использовались для сравнения с расчетами.

На рис. 3 представлены графики изменения характеристик движения автомобиля, полученные при расчете и при испытаниях. Для каждой характеристики на графиках представлены значения при испытаниях, при расчете и расхождение между ними. Расхождения определялись следующим образом

$$\Delta(t) = \frac{|T(t) - S(t)|}{(T_{\max} - T_{\min})} \cdot 100 [\%],$$

где t - время; $T(t)$ - значение характеристики при испытаниях; $S(t)$ - значение характеристики при расчете; $T_{\max}$ - максимальное значение характеристики при испытаниях; $T_{\min}$ - минимальное значение характеристики при испытаниях.

Среднее расхождение между испытаниями и расчетом для каждой характеристики определялось следующим образом

$$\bar{\Delta} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \Delta(t) dt}{(t_1 - t_0)},$$

где t_0, t_1 - начало и окончание временного интервала характерного движения автомобиля, на котором определялось среднее расхождение характеристики между испытаниями и расчетом. Для представленного случая было принято $(t_1 - t_0) = 2.5 [\text{сек}]$.

Среднее расхождение между расчетными и экспериментальными значениями по приведенным на графиках четырем характеристикам составляет 7.4 %. Расхождения между расчетом и испытаниями объясняются следующими причинами.

1. Погрешности измерений характеристик при испытаниях. К ним относятся погрешности измерительных датчиков, погрешности их установки и погрешности обработки записанных показаний. По экспертным оценкам в рассматриваемом случае эти погрешности составляют примерно 2% от диапазона изменения характеристики.
2. Погрешности исходных данных модели. Они связаны с невозможностью точного определения значительного множества характеристик конструкции автомобиля, проходившего испытания. Например, в рассматриваемом случае к ним следует отне-

сти недостоверность задания в модели характеристик рессор, амортизаторов и других параметров автомобиля.

3. Погрешности структуры модели. Они связаны с принятыми в модели допущениями и идеализациями по сравнению с реальным автомобилем. Например, в представленной модели кузов автомобиля, включая все его агрегаты и экипаж, рассматривался как единое абсолютно жесткое тело, не рассматривалась боковая податливость мостов ходовой части автомобиля, а также были приняты другие допущения. Структуру модели следует уточнять в том случае, если расхождения между расчетом и натурными испытаниями существенно превышают суммарные расхождения из-за погрешностей измерений и погрешностей исходных данных.

В таблице 1 представлены результаты оценки ожидаемых погрешностей расчета характеристик движения автомобиля, связанных с недостоверностью исходных данных модели. Ожидаемые погрешности исходных параметров модели представлены в первом столбце таблицы. Их значения были определены с использованием экспертных оценок. Ожидаемая погрешность каждой характеристики, связанная с погрешностью i -го исходного параметра, определялась следующим образом

$$\Delta_i(t) = \frac{|S_i(t) - S(t)|}{(T_{\max} - T_{\min})} \cdot \frac{1}{100} [\%],$$

где $S(t)$ - значение характеристики при расчете при ожидаемых значениях исходных параметров; $S_i(t)$ - значение характеристики при расчете при отклонении i -го исходного параметра на величину его ожидаемой погрешности.

Средняя ожидаемая погрешность каждой характеристики, связанная с погрешностью i -го исходного параметра, определялась следующим образом

$$\bar{\Delta}_i = \frac{\int_0^1 \Delta_i(t) dt}{(1 - t_0)}.$$

Предполагается, что погрешности исходных параметров являются независимыми случайными величинами. Поэтому средняя ожидаемая погрешность каждой характеристики, связанная с погрешностью всех исходных параметров, определялась следующим образом

$$\bar{\Delta}_{BD} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{\Delta}_i)^2},$$

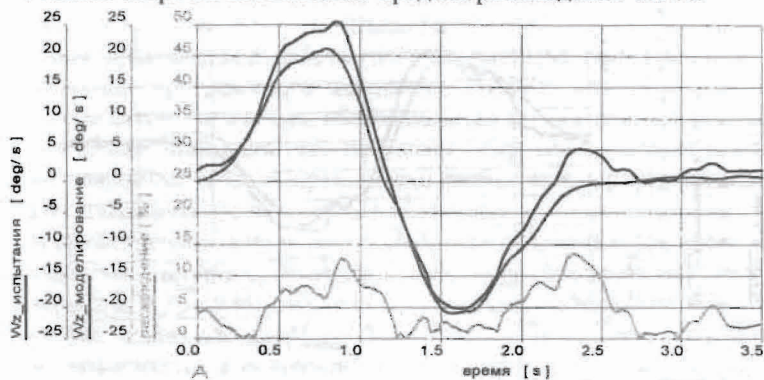
где n - количество исходных параметров, по которым производится оценка погрешностей характеристик.

Сравнивая ожидаемые погрешности характеристик, связанные с погрешностями исходных параметров модели, и расхождения расчета с натурными испытаниями (две нижние строки в таблице 1) можно сделать вывод о том, что расхождения между расчетом и натурными испытаниями объясняются, в основном, именно погрешностями исходных параметров модели.

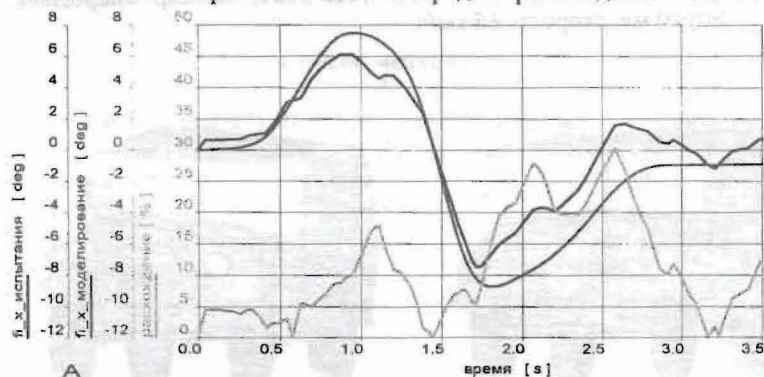
Таблица 1. Ожидаемые погрешности расчета характеристик движения автомобиля, связанные с недостоверностью исходных данных модели.

Ожидаемая погрешность исходных данных	Средняя ожидаемая погрешность характеристик (на интервале 2.5 с) %			
	Wz	$\bar{f}_x$	Ay1	Ay2
1. Передн. и задн. амортизаторы. (15. %)	0.60	1.10	0.90	0.90
2. Жесткость передн. и задн. рессор. (5. %)	0.24	2.00	0.44	0.38
3. Трение передн. и задн. рессор. (25. %)	0.90	3.10	1.40	1.25
4. Момент инерции кузова продольн. (10. %)	0.18	0.58	0.33	0.34
5. Момент инерции кузова вертикал. (10. %)	0.48	0.92	0.54	0.53
6. Жесткость шин. (10. %)	0.39	0.63	0.72	0.60
7. Боковой увод шин. (20. %)	2.58	5.88	4.38	4.20
8. Демпфирование шин. (50. %)	0.16	0.24	0.32	0.26
9. Высота ЦМ автомобиля. (кузов +25 мм; а/м +19.8 мм)	0.84	2.96	1.24	1.30
10. Аэродинамика. (15. %)	0.12	0.19	0.20	0.18
11. Учет боковых перемещений водителя. (оценка)	1.91	3.52	0.84	0.76
Итоговые результаты				
Общая ожидаемая погрешность характеристик	3.6	8.5	5.0	4.8
Расхождение с натурными испытаниями	5.6	11.0	6.8	6.4

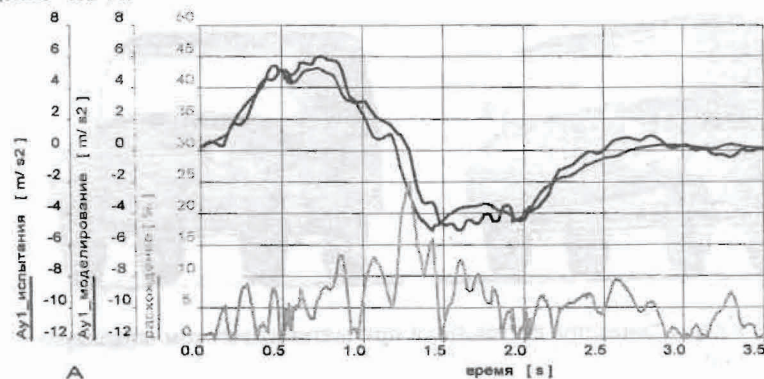
Угловая скорость автомобиля. Среднее расхождение 5.6 %.



Угол бокового крена автомобиля. Среднее расхождение 11.0 %.



Поперечное ускорение над осью передних колес. Среднее расхождение 6.8 %.



Поперечное ускорение над осью задних колес. Среднее расхождение 6.4 %.

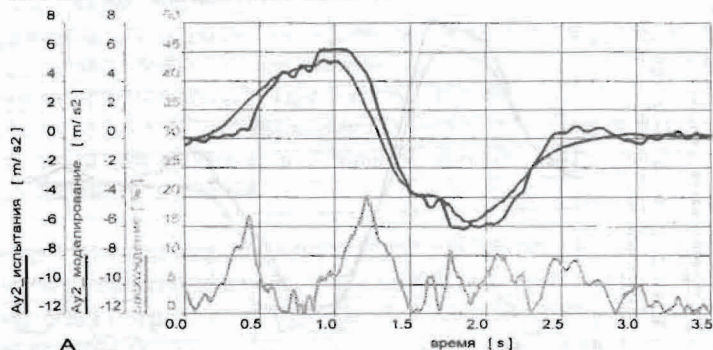


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования с результатами натурных испытаний автомобиля УАЗ-3151, маневр «переставка $S_p=20$ м», скорость 65 км/ч.

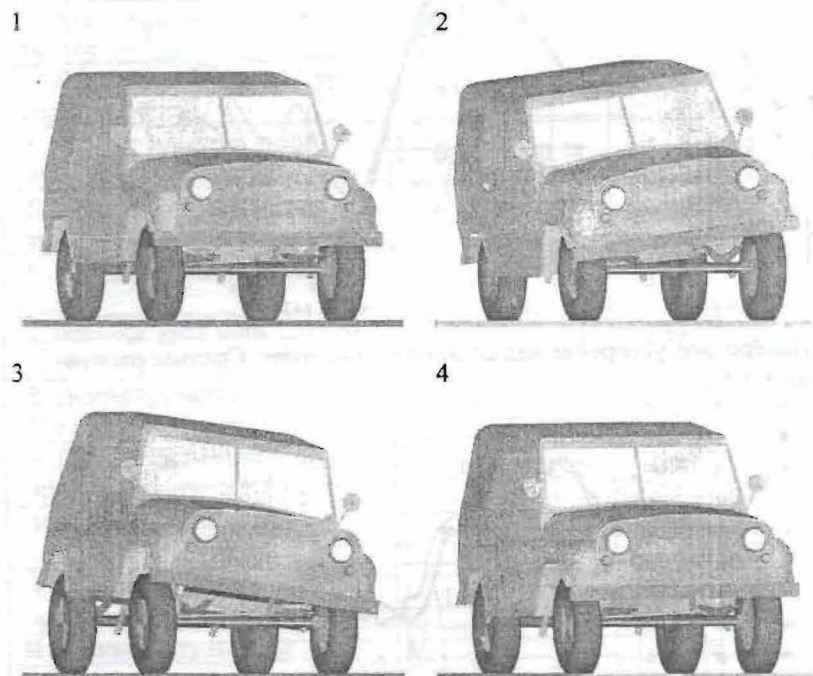


Рис. 4. Кадры движения автомобиля при математическом моделировании

Выводы

Опыт практической работы показал высокую эффективность использования программного комплекса ЭЙЛЕР для моделирования движения автомобилей. Она обеспечивается автоматической генерацией уравнений движения, что позволяет оперативно создавать достаточно подробные модели практически любых автомобилей и исследовать их динамическое поведение в различных условиях.

В представленном примере сравнения результатов моделирования с результатами натурных испытаний среднее расхождение значений характеристик в процессе движения автомобиля составляет 7,4 %. Проведенный анализ ожидаемых погрешностей показал, что это расхождение объясняется в основном погрешностями исходных параметров модели, уточнить которые в данном случае не представлялось возможным.

Список литературы

1. ОСТ 37.001.471-88. Управляемость и устойчивость автотранспортных средств. Методы испытаний.