

УДК

РЕКОНСТРУКЦИЯ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ФРОНТАЛЬНОМ УДАРЕ ПРИ ПОМОЩИ ЛИНЕЙНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ.

А.С. Курдюк, А.А. Новиков, Иванчук Е.А.
(АО «АВТОВАЗ», г. Тольятти)

В настоящее время введены в действие новые требования к безопасности автомобиля. В частности, испытания на фронтальный удар в деформируемый барьер проводятся на повышенных скоростях с перекрытием 40% по ширине автомобиля. При этом за промежуток времени порядка 0.2 с автомобиль совершает сложное движение с заметными поворотами относительно всех трех осей координат (повороты – порядка нескольких десятков градусов). Для анализа травмирования манекена необходимо воспроизведение поведения автомобиля при ударе как жесткого целого на протяжении 0.15 – 0.2 с.

Для решения этой задачи используют линейные акселерометры, устанавливаемые в те места кузова автомобиля, которые не подвергаются заметным деформациям. Показания акселерометров могут быть использованы для вычисления угловых ускорений и угловых скоростей автомобиля как жесткого целого. По сравнению с обычным фронтальным ударом, когда заметным угловым движением автомобиля является только его поворот относительно оси Y, задача реконструкции движения автомобиля при ударе с перекрытием является заметно более сложной. Поэтому традиционная схема установки акселерометров (датчики на левом и правом порогах автомобиля) в этом случае непригодна.

В [1] рассмотрены два способа установки акселерометров, теоретически позволяющие решить эту задачу (рис.1).

Способ, использующий 6 акселерометров, иллюстрируется рис.1а. Он может быть реализован, например, в виде :

- трехосевой акселерометр на левом пороге автомобиля (т.1);
- два линейных акселерометра в верхней части средней стойки (т.2) по осям X и Y;
- линейный акселерометр на правом пороге (т.3) по оси X.

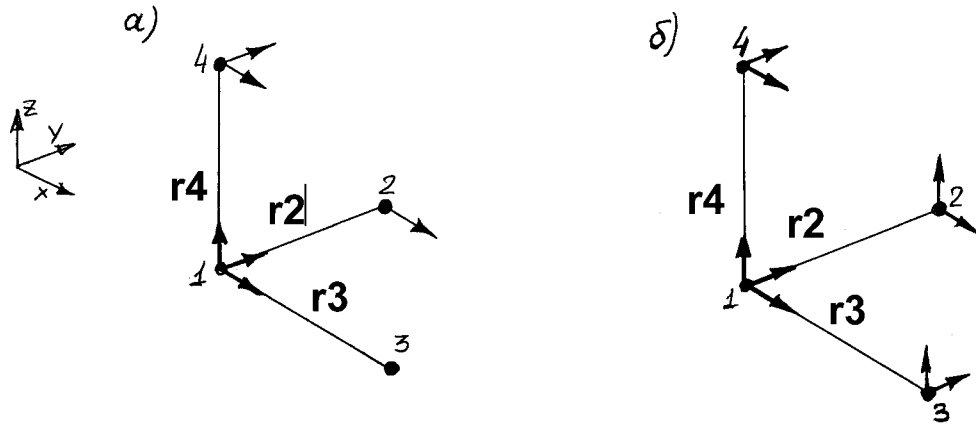


Рис.1. Схемы установки линейных акселерометров для реконструкции углового движения автомобиля при фронтальном ударе :

- а) схема 6 акселерометров
- б) схема 9 акселерометров

В этом случае для вычисления угловых ускорений автомобиля должны использоваться дифференциальные уравнения типа

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_z &= -(A_{2x} - A_{1x}) / r_{2y} + w_y w_x \\
 \varepsilon_x &= -(A_{4y} - A_{1y}) / r_{4z} + w_z w_y \\
 \varepsilon_y &= (A_{4x} - A_{1x}) / r_{4z} - w_x w_z
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Анализ выражений (1) показывает, что они непригодны для практического использования на заметных интервалах времени (свыше 50 мс) при величинах линейных ускорений порядка десятков g. Этот недостаток определяется членами в правой части, зависящими от произведения угловых скоростей. Поскольку для их вычисления требуется интегрирование, а при реальных замерах всегда присутствуют ошибки, использование этих выражений очень быстро приводит к неконтролируемому росту погрешности вычисления угловых скоростей и угловых ускорений.

Более устойчивой является схема рис. 1б. Использование двух пар акселерометров для каждого углового ускорения позволяет получить более устойчивые уравнения (2), в которых отсутствуют члены с накапливающейся погрешностью :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= +(A_{2z} - A_{1z}) / 2r_{2y} - (A_{4y} - A_{1y}) / 2r_{4z} \\
 \varepsilon_z &= (A_{3y} - A_{1y}) / 2r_{3x} - (A_{2x} - A_{1x}) / 2r_{2y} \\
 \varepsilon_y &= (A_{4x} - A_{1x}) / 2r_{4z} - (A_{3z} - A_{1z}) / 2r_{3x}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Для проверки способа реконструкции движения автомобиля при фронтальном ударе, использующего предложенную в [1] методику, нами была использована математическая модель, воспроизводящая движение автомобиля, как жесткого целого.

К центру масс модели были приложены линейные и угловые скорости, типичные для фронтального удара с перекрытием. На рис. 2 показаны заданные функции движения центра масс автомобиля по оси X (в м/с) и угловые скорости движения автомобиля вокруг локальных осей X, Y и Z (осей, связанных с центром масс автомобиля)

В модели была воспроизведена схема измерения линейных ускорений, описанная в таблице 1. Проверено, что эта схема измерений может быть реализована для автомобиля ВАЗ-1118.

Установка акселерометра 3 на левый порог нежелательна из-за высокой вероятности появления в этом месте пластических деформаций и связанного с этим искажения реконструкции движения. Моделирование было реализовано с помощью программного комплекса PRADIS. Записанные в ходе моделирования

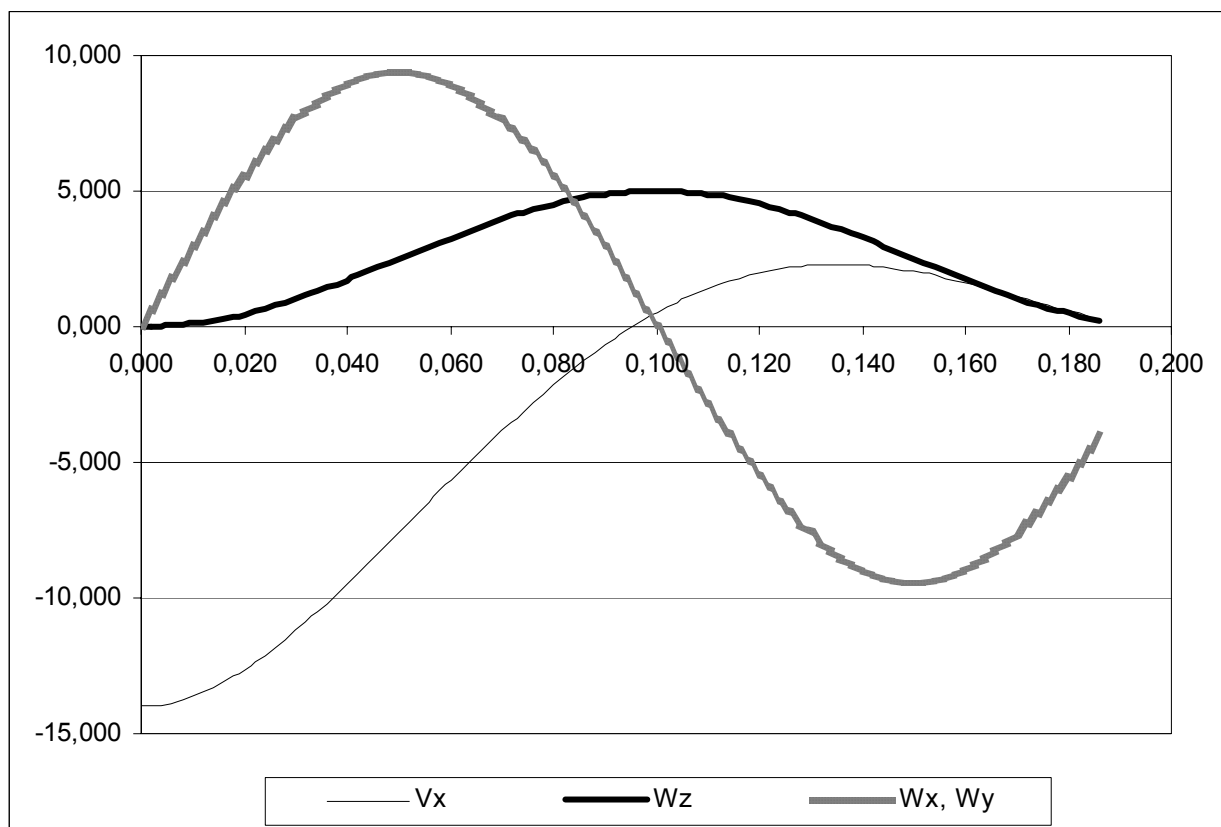


Рис.2. Типовые функции, задающие движение центра масс автомобиля при фронтальном ударе – скорость центра масс в продольном направлении V_x , угловая скорость вокруг локальной оси Z (W_z), угловые скорости вокруг локальных осей X и Y (приняты одинаковыми, но W_y была приложена к телу в отрицательном направлении для реализации типичного “клевка” вперед в начальной фазе удара)

показания акселерометров были в дальнейшем использованы в выражениях (2) для реконструкции углового движения автомобиля.

Таблица 1. Расположение акселерометров в модели для реконструкции углового движения автомобиля. .

N точки	Расположение в автомобиле	Координаты			Рабочие оси
		X	Y	Z	
1	Багажник, слева внизу	2,700	-0,445	0,340	X, Y, Z
2	Багажник, справа внизу	2,700	0,445	0,340	X, Z
3	Правый порог	1,502	0,652	0,051	Y, Z
4	Багажник, в районе крышки	2,670	-0,415	1,010	X, Y

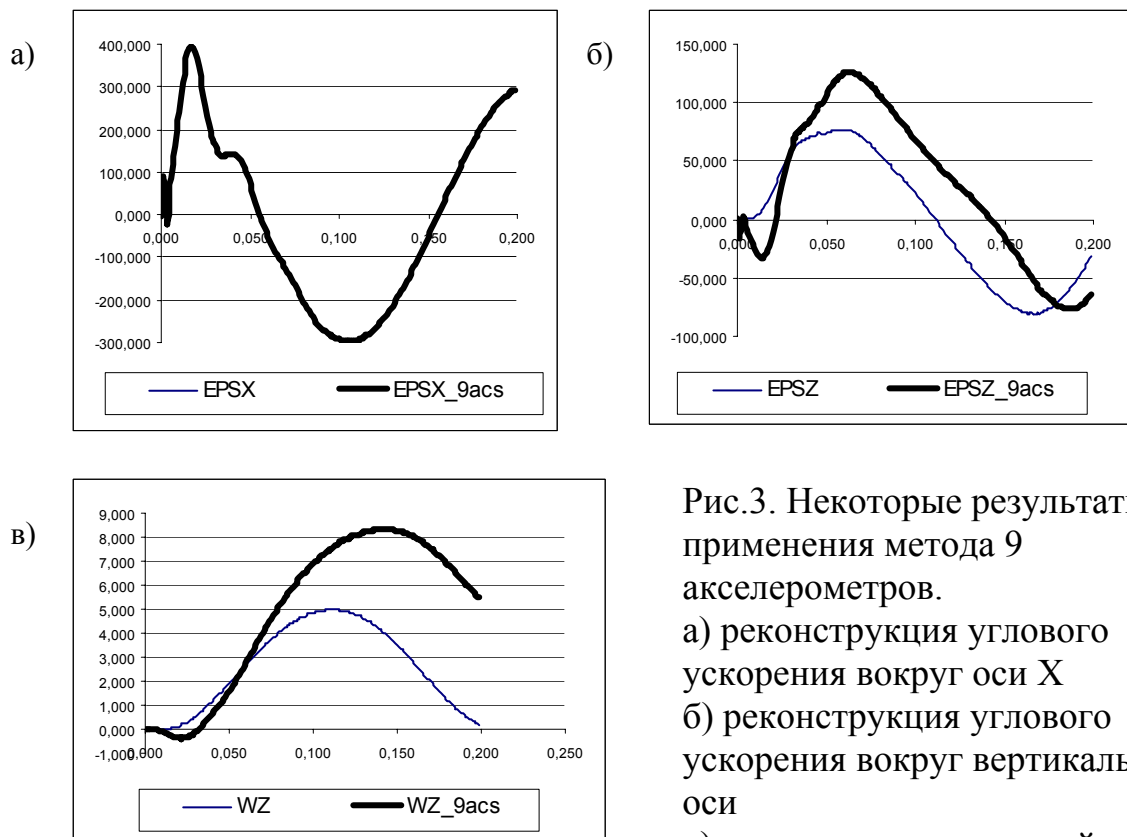


Рис.3. Некоторые результаты применения метода 9 акселерометров.

а) реконструкция углового ускорения вокруг оси X

б) реконструкция углового ускорения вокруг вертикальной оси

в) реконструкция угловой скорости вокруг вертикальной оси.

Некоторые результаты моделирования показаны на рис.3. На рисунке видно, что если реконструкция углового ускорения автомобиля вокруг оси X дала практически точный результат, то вычисление углового ускорения и угловой скорости автомобиля вокруг вертикальной оси можно считать удовлетворительным, видимо, только до 50-60 мс. Дальше получены заметные погрешности.

Полученные результаты показывают, что применение метода 9 акселерометров в том виде, в котором оно было предложено в первоисточнике, для реконструкции движения автомобиля неприемлемо. Анализ показал, что ошибка определяется неортогональностью осей 1-2, 1-3 и 1-4. Поэтому необходимо вернуться к исходным посылкам [1], учитывая на этот раз, что ортогональность осей 1-2, 1-3 и 1-4 в реальных испытаниях автомобиля обеспечить невозможно.

Движение точки твердого тела определяется зависимостью

$$Ap = \ddot{R} + \vec{\omega} * (\vec{\omega} * \vec{r}) + \vec{\varepsilon} * r$$

где \ddot{R} - ускорение начала координат (в нашем случае – точки 1)

r – радиус вектор точки P относительно начала координат,

ω и ε – угловая скорость и угловое ускорение автомобиля.

Учитывая, что

$$\vec{\omega} = \omega_x i + \omega_y j + \omega_z k$$

$$\vec{r} = r_x i + r_y j + r_z k$$

$$\vec{\varepsilon} = \varepsilon_x i + \varepsilon_y j + \varepsilon_z k$$

получим

$$\vec{\omega} * \vec{r} = (\omega_x i + \omega_y j + \omega_z k) * (r_x i + r_y j + r_z k) =$$

$$= i(\omega_y r_z - \omega_z r_y) + j(\omega_z r_x - \omega_x r_z) + k(\omega_x r_y - \omega_y r_x) = iC_x + jC_y + kC_z$$

$$\vec{\omega} * (\vec{\omega} * \vec{r}) = (\omega_x i + \omega_y j + \omega_z k) * (iC_x + jC_y + kC_z) =$$

$$= i(\omega_y C_z - \omega_z C_y) + j(\omega_z C_x - \omega_x C_z) + k(\omega_x C_y - \omega_y C_x) = iD_x + jD_y + kD_z,$$

где

$$D_x = \omega_y C_z - \omega_z C_y = \omega_y (\omega_x r_y - \omega_y r_x) - \omega_z (\omega_z r_x - \omega_x r_z) = \omega_y \omega_x r_y - \omega_y^2 r_x - \omega_z^2 r_x + \omega_x \omega_z r_z$$

$$D_y = \omega_z C_x - \omega_x C_z = \omega_z (\omega_y r_z - \omega_z r_y) - \omega_x (\omega_x r_y - \omega_y r_x) = \omega_z \omega_y r_z - \omega_z^2 r_y - \omega_x^2 r_y + \omega_x \omega_y r_x$$

$$D_z = \omega_x C_y - \omega_y C_x = \omega_x (\omega_z r_x - \omega_x r_z) - \omega_y (\omega_y r_z - \omega_z r_y) = \omega_x \omega_z r_x - \omega_x^2 r_z - \omega_y^2 r_z + \omega_y \omega_z r_y$$

и

$$\vec{\varepsilon} * \vec{r} = (\varepsilon_x i + \varepsilon_y j + \varepsilon_z k) * (r_x i + r_y j + r_z k) =$$

$$= i(\varepsilon_y r_z - \varepsilon_z r_y) + j(\varepsilon_z r_x - \varepsilon_x r_z) + k(\varepsilon_x r_y - \varepsilon_y r_x) = iE_x + jE_y + kE_z$$

Итоговое выражение для вычисления ускорения произвольной точки

$$A_r = i(R_x + D_x + E_x) + j(R_y + D_y + E_y) + k(R_z + D_z + E_z)$$

Для вычисления угловых ускорений используем выражения для разностей ускорений в точках 2,3,4 и в центре координат. После несложных выкладок получаем :

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= +(A_{2z} - A_{1z}) / 2r_{2y} - (A_{4y} - A_{1y}) / 2r_{4z} + \Delta_{4x} / 2r_{4z} - \Delta_{2x} / 2r_{2y} \\ \varepsilon_z &= (A_{3y} - A_{1y}) / 2r_{3x} - (A_{2x} - A_{1x}) / 2r_{2y} + \Delta_{2z} / 2r_{2y} - \Delta_{3z} / 2r_{3x} \\ \varepsilon_y &= (A_{4x} - A_{1x}) / 2r_{4z} - (A_{3z} - A_{1z}) / 2r_{3x} + \Delta_{3y} / 2r_{3x} - \Delta_{4y} / 2r_{4z}\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$\begin{aligned}\Delta_{2z} &= (\varepsilon_y r_{2z} - w_y^2 r_{2x} - w_z^2 r_{2x} + w_x w_z r_{2z}) \\ \Delta_{2x} &= (-\varepsilon_y r_{2x} - w_y^2 r_{2z} - w_x^2 r_{2z} + w_x w_z r_{2x}) \\ \Delta_{3z} &= (-\varepsilon_x r_{3z} - w_x^2 r_{3y} - w_z^2 r_{3y} + w_x w_y r_{3z}) \\ \Delta_{3y} &= (\varepsilon_x r_{3y} - w_y^2 r_{3z} - w_x^2 r_{3z} + w_y w_z r_{3y}) \\ \Delta_{4x} &= (\varepsilon_z r_{4x} - w_z^2 r_{4y} - w_x^2 r_{4y} + w_x w_y r_{4x}) \\ \Delta_{4y} &= (-\varepsilon_z r_{4y} - w_z^2 r_{4x} - w_y^2 r_{4x} + w_y w_x r_{4y})\end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что выражения (3) отличаются от исходных выражений (2) наличием дополнительных членов, учитывающих неортогональность осей, соединяющих акселерометры. Нелинейные дифференциальные уравнения (3) были использованы для реконструкции углового движения автомобиля в тестовом примере. Полученное расхождение исходных и реконструированных угловых ускорений и угловых скоростей составило менее 1% и лежит в пределах вероятной погрешности численного интегрирования, которое применялось для решения уравнений (3). Заметим, что уравнения (3) содержат члены, приводящие к накоплению ошибки измерений. Таким образом, использование уравнений 3 исправляет погрешности, вызванные неортогональностью осей 1-2,1-3 и 1-4, однако оставляет требование минимизации такого отклонения из-за возможного накопления ошибок измерения.

Таким образом, для реконструкции углового движения автомобиля рекомендуется использовать измерения по схеме 9 акселерометров. Вычисление угловых ускорений в локальных осях производится по зависимостям (3). При этом, по возможности, следует стремиться к максимальной ортогональности осей 1-2, 1-3, 1-4.

1. Измерение углового ускорения жесткого тела при помощи линейных акселерометров. A.J. Padgaonkar, K.W. Krieger, A.I. King, Biomechanics Research Center, Wayne State University, Detroit, Mich.