

Сравнительное исследование схем установки линейных акселерометров для реконструкции углового движения автомобиля при испытаниях на фронтальный удар

Курдюк С.А., Новиков А.А., НТЦ ОАО «АВТОВАЗ»

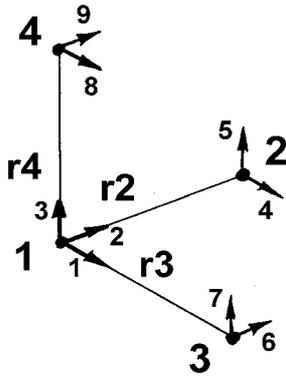


Рис.1. Схема измерений ускорений автомобиля на основе 9 датчиков

Для восстановления углового движения автомобиля целесообразно применять схему измерений рис. 1, предусматривающую установку в 4 специально подготовленных местах 9 линейных акселерометров [1]. Для вычисления угловых скоростей и угловых ускорений автомобиля вокруг локальных осей нами предложено использовать нелинейные дифференциальные уравнения (1). Подставляя в (1) замеренные значения ускорений и интегрируя эти выражения по времени, получаем мгновенные значения угловых ускорений и угловых скоростей автомобиля по локальным осям:

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

,где

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

Уравнения (1) при отсутствии ошибок измерений приводят к точной реконструкции углового движения автомобиля. В случае, если значения линейных ускорений и величины радиус-векторов r_2, r_3, r_4 определены с некоторой погрешностью, дополнительные члены (2) приводят к накоплению величины ошибки, тем большей, чем больше анализируемый промежуток времени, поскольку они зависят от произведений угловых скоростей.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ различных схем установки линейных акселерометров на автомобиле и выбор схем установки, дающих минимально возможную погрешность. Поскольку в разных

случаях при различных сочетаниях измеряемых ускорений и конкретных мест установки акселерометров влияние каждого из них на итоговую погрешность замера различно, задача выявления влияния каждого акселерометра на общие результаты измерений является довольно сложной. Эту работу нельзя провести в реальных экспериментах из-за ограниченного объема информации, получаемой в испытаниях, и отсутствия повторяемости экспериментов, не позволяющих проводить сравнительный анализ результатов при небольших вариациях исходных условий. Поэтому для решения задачи использовалось математическое моделирование. Но даже и использование расчетов приводит к необходимости рассмотрения весьма большого количества вариантов. Для ограничения количества расчетов применялся механизм планирования эксперимента.

В этой работе использовалось 2 набора данных - 1) тестовый набор “типовых” угловых скоростей автомобиля при ударе, включающий поворот автомобиля вокруг вертикальной оси и повороты автомобиля вокруг продольной и поперечной осей рис.2. Этот набор данных использовался всякий раз, когда требовалось определить погрешность вычисления угловых скоростей, поскольку известны их точные величины. 2) Данные, полученные в реальном эксперименте по известной схеме замера. Использовались для сравнительного анализа устойчивости измерительных схем, поскольку точные значения угловых скоростей автомобиля для них неизвестны.

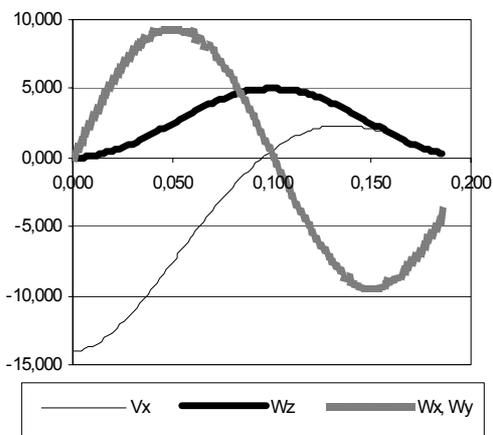


Рис.2. Типовые функции, задающие движение центра масс автомобиля при фронтальном ударе – скорость центра масс в продольном направлении V_x , угловая скорость вокруг локальной оси Z (W_z), угловые скорости вокруг локальных осей X и Y (приняты одинаковыми, но W_y была приложена к телу в отрицательном направлении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

На первом этапе исследования выбранных схем замера определялись регрессионные зависимости погрешности вычисления максимума угловой скорости (этот параметр выбран в качестве критерия точности используемой схемы измерений) от погрешностей показаний акселерометров :

$$\Delta W = \alpha_0 + \alpha_i * \Delta A_i, i = 1,9 \quad (3)$$

где ΔW - погрешность определения максимума угловой скорости по локальным осям X, Y, Z ;

α_i - коэффициент влияния погрешности показаний i -го акселерометра схемы на погрешность вычисления максимума угловой скорости ;

ΔA – погрешность показаний i -го акселерометра.

Для построения регрессионной зависимости использовались дробные реплики 2^{9-4} разрешающей способности IV. Каждый блок экспериментов предполагал проведение одного базового расчета для вычисления исходной точки (максимумов угловых скоростей по каждой локальной оси автомобиля) и 32 расчетов при различных сочетаниях варьируемых параметров – погрешностей акселерометра. Использовался первый тестовый набор данных.

Принято, что максимальная погрешность акселерометров, используемых для измерения ускорений автомобиля, составляет 5%. Принято также, что погрешность угла установки оси датчика может достигать 5 градусов. Эта погрешность практически не влияет на чувствительность вдоль рабочей оси, но приводит к паразитной чувствительности датчика к ускорениям по осям, перпендикулярным рабочей. Принято, что влияние погрешности установки в этом случае составляет 8.7% ($\sin 5^\circ$). Поэтому максимальная погрешность датчика составит 10 % ($\sqrt{0.05^2 + 0.087^2}$), а величина стандартного отклонения ошибки для этого случая – 3.3%. В экспериментах приняты уровни варьирования погрешности акселерометров -10% (соответствует -1) и + 10% (соответствует +1).

В работе анализировалась схема измерений ускорений, ранее использованная в одном из испытаний автомобиля на фронтальный удар (Таблица 1). Использование правого порога в схеме измерений диктовалось тем, что при фронтальном ударе с перекрытием появление пластических деформаций в этой зоне маловероятно, что теоретически должно повысить достоверность получаемого результата.

Таблица 1. Расположение акселерометров в реальном фронтальном ударе автомобиля с перекрытием.

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

Это расположение датчиков сравнивалось с “правильным” – когда точка 3 располагается на левом пороге автомобиля (при этом, конечно, нужно гарантировать отсутствие деформаций в месте установки датчиков). Для этой схемы координата Y третьей точки становится равной -0.625. В дальнейшем для краткости будем называть схему измерений по таблице 1 “real”, схему с датчиком на левом пороге – “realm”. Коэффициенты регрессии определялись как для алгоритма расчета ускорений по формулам (1), так и для упрощенного алгоритма, рекомендованного [1]. Результаты расчета коэффициентов регрессии (3) для этих схем приведены в табл.2

Для анализа результатов удобно воспользоваться рис. 3. Здесь показаны датчики, влияние которых на результат вычисления соответствующей угловой скорости должен быть преобладающим. Если анализ результатов показывает, что на погрешность вычисления угловой скорости влияют датчики, не показанные на рис.3, или отсутствует чувствительность схемы к “нужным”

датчикам, то такую схему измерений следует признать неудачной. Например, схема “Real” является весьма неудачной для определения величин W_y и W_z – присутствуют заметные зависимости результатов измерений от показаний датчиков, которые не должны влиять на результат (датчики 2,5, 9 для W_y , датчики 3,5, 9 для W_z). Кроме того, отсутствует чувствительность результатов по W_z ко 2 и 4 датчикам. Переход к схеме измерений “real m” устраняет перечисленные проблемы. Больше того, схема “real m” позволяет без существенного ухудшения результатов использовать упрощенный алгоритм расчета угловых ускорений [1].

Дополнительную информацию по оценке этих схем измерений можно получить, проводя дисперсионный анализ расчетных экспериментов в предположении, что эти результаты обусловлены случайными ошибками акселерометров. Результаты, приведенные в табл.3., позволяют оценить устойчивость работы схемы по отношению к точности замеров.

Таблица 2. Коэффициенты регрессии для схем real и realm при разных алгоритмах реконструкции углового движения автомобиля.

Схе ма	Пара метр	Алго ритм	Акселерометр								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Real	W_x	[2]		0.55	-0.49		1.43				0.45
	W_y		-1.00	-0.27	-0.10		-0.76		0.33	0.16	-0.24
	W_z		0.89	-----	0.24	-----	-0.62	0.39			-0.20
Real m	W_x	[2]		0.55	-0.49		1.41				0.45
	W_y		-1.12		-0.39				-0.71	0.16	
	W_z		1.14	0.30		-0.09		-0.26			
Real m	W_x	[1]		0.56	-0.49		1.43				0.45
	W_y		-1.01		-0.36				-0.66	0.11	
	W_z		1.00	0.07		-0.07		-0.05			

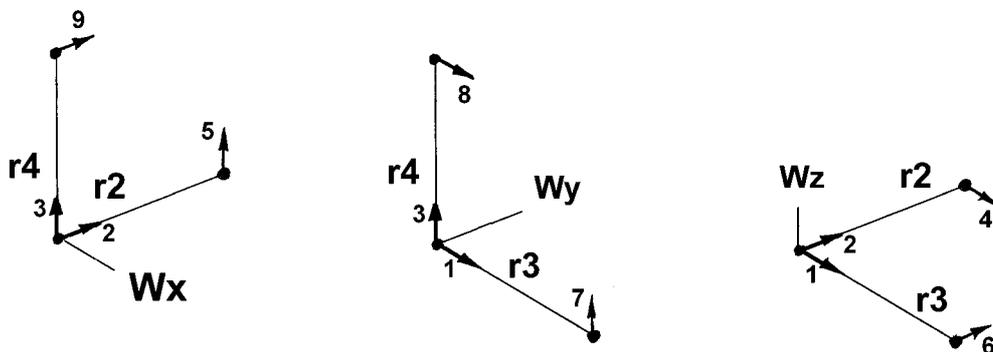


Рис.3. Схема для определения основных датчиков при вычислении соответствующих угловых скоростей. Так, на результаты вычисления угловой скорости W_x в хорошей схеме измерений должны влиять в основном датчики 2,3,5 и 9.

Видно, что среднеквадратичное отклонение (СКО) результатов от среднего для всех схем примерно одинаково, однако схема измерений “real” (т.е., с “неправильным” положением оси 3) дает самые заметные отклонения мат. ожидания измеренной величины от точного значения. Для Wz это отклонение составляет 8%, что заметно хуже, чем даже для схемы “real m” с применением упрощенного алгоритма расчета угловых скоростей [1].

Таблица 3. Результаты статистической обработки расчетных экспериментов по анализу двух схем измерений и разных алгоритмов расчета угловых ускорений.

	Точное значение скорости	Схема “real”, алгоритм расчета [2]		Схема “real m”, алгоритм расчета [2]		Схема “real m”, алгоритм расчета [1]	
		Среднее	СКО	Среднее	СКО	Среднее	СКО
Wx	9.67	9.67	0.83	9.65	0.83	9.71	0.83
Wy	-9.32	-9.35	0.68	-9.33	0.70	-9.56	0.63
Wz	5.02	4.60	0.60	5.04	0.61	4.78	0.50

Анализ результатов для рассмотренных схем измерений показал, что предпочтительным является использование схем с небольшим отклонением от перпендикулярности осей 2,3,4. При этом отклонения от перпендикулярности 100-300 мм при длинах R2-R4 порядка 800-1000 мм не являются критичными.

Целью **второго** этапа работы был анализ влияния на результаты места расположения датчиков на автомобиле и длины измерительных плеч. В таблице 4 приводятся данные по 4 исследованным схемам с условными обозначениями S0-S3. Схема S0 близка к традиционной – датчики 1 и 2 на порогах, датчик 3 – в задней части автомобиля, датчик 4 – на крыше. Схема S1 отличается от схемы S0 размером плеч. Схема S2 с теми же плечами, что и схема S1, но сильно смещена к задней части автомобиля. Схема S3 по отношению к S2 смещена по вертикали (близкая к этой схема может быть реализована в реальном автомобиле при расположении датчиков в багажнике). Во всех схемах принято взаимно перпендикулярное расположение плеч.

Таблица 4. Координаты и параметры измерительных схем.

Условное обозначение схемы	Расстояние от центра масс автомобиля до точки 1 схемы			Координаты векторов, соединяющих т.1 и точки 2,3,4									
				R2			R3			R4			
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	
S 0	0.2	-0.5	0		1.00		0.80						1.00
S 1	0.2	-0.25	0		0.50		0.30						0.30
S 2	1.2	0.0	0		0.50		0.30						0.30
S 3	1.2	0.0	0.5		0.50		0.30						0.30

Схемы S1 – S3 с укороченными плечами разработаны для случая, когда для измерений используется устройство, позволяющее обеспечить точную

перпендикулярность плеч схемы, замеренные с высокой точностью их размеры и точную угловую ориентацию акселерометров. В расчетах принято, что угловая погрешность установки акселерометра отсутствует, а максимальная погрешность замеров составляет 5%. Поэтому коэффициенты регрессии (3) для исследуемых схем определялись для уровней варьирования ошибки акселерометров 10% и 5%. В расчетах использовался второй тестовый набор данных.

Таблица 5. Коэффициенты регрессии ошибки расчета угловой скорости для схем S0-S3 при разных погрешностях замеров ускорения (10% и 5%)

Схема	Параметр	Уровень варьирования	Акселерометр								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
S 0	Wx	10%		0.19	0.62		0.32				0.80
	Wy		-0.85		-0.88				-0.11	-0.04	
	Wz		1.51	-0.22		-0.57		0.28			
S 1	Wx	10%		0.46	0.78		0.16				0.54
	Wy		-2.31		-1.54				0.55	1.43	
	Wz		2.55	-0.13		-1.61		0.19			
S2	Wx	10%		0.57	-1.11		2.05				0.42
	Wy		-1.56		1.66				-2.65	0.68	
	Wz		1.41	-0.23	0.08	-0.47		0.28			
S2	Wx	5%		0.29	-0.56		1.03				0.21
	Wy		-0.77		0.84				-1.33	0.33	
	Wz		0.74	-0.16		-0.27		0.19			
S 3	Wx	5%		-0.64	-0.59		1.06				1.14
	Wy		0.18		0.76				-1.25	-0.63	
	Wz		0.56	0.09		-0.09		0.06			

Таблица 6. Результаты статистической обработки расчетных экспериментов по анализу схем измерений S0-S3 и различной погрешности показаний акселерометров.

Схема			Wx		Wy		Wz	
			Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО	Среднее значение	СКО
Точное значение			9.65		-9.32		5.02	
S 0	Уровень варьирования ошибки акселерометров	10 % (СКО 3.3%)	9.67	0.54	-9.35	0.61	5.02	0.83
S 1			9.66	0.53	-9.48	1.61	5.05	1.51
S 2			9.68	1.22	-9.39	1.78	5.07	0.78
S 2		5% (СКО 1.7%)	9.67	0.61	-9.36	0.89	5.01	0.41
S 3			9.66	0.89	-9.37	0.80	5.08	0.30

Результаты определения коэффициентов регрессии приводятся в таблице 5, а результаты статистического анализа схем измерений – в таблице 6.

Анализ приведенных данных показывает, что в схеме 2 для 10% погрешности акселерометра имеется незначительная паразитная чувствительность к показаниям датчика 3. Все рассмотренные схемы имеют очень хорошее мат. ожидание результата, однако, с точки зрения чувствительности ошибки измерений к погрешности показаний акселерометров заметные преимущества имеют схемы S2 и S3 с точным базированием акселерометров.

Основные выводы из проведенной работы :

- По большинству параметров наиболее устойчивой к ошибкам измерений является схема с точной базировкой осей акселерометров и точно обеспеченной перпендикулярностью осей r_2 , r_3 и r_4 . Оптимальным местом расположения схемы является смещенное относительно продольной оси положение в багажнике автомобиля.
- Вторым по важности фактором является возможное увеличение плечей схемы – расстояний между точками 1-4 (схема 0). При использовании такой схемы измерения важными являются вопросы базировки акселерометров и точного определения координат их установки.
- При использовании схем с большими плечами (типа S0, real m) и использования для обработки результатов зависимостей (1) допускается разумное отклонение от перпендикулярности измерительных плеч (100-300 мм при длине плеча 800-1000мм)

Литература.

1. Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers. A.J. Padgaonkar, K.W. Krieger, A.I. King, Biomechanics Research Center, Wayne State University, Detroit, Mich. Journal of Applied Mechanics, 1975.