



УДК 629.017

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ МОБИЛЬНЫХ МАШИН ПУТЕМ СНИЖЕНИЯ МОНТАЖНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДАТЧИКОВ

Подригало М.А., д.т.н.,

Полянский А.С., д.т.н.,

Клец Д.М., к.т.н.,

Дубинин Е.А., к.т.н.

Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

Артёмов Н.П., к.т.н.,

Задорожня В.В., аспирант

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. Петра Василенко

Тел.: 057-700-38-98

Анотация – получены выражения для расчета поправок на неточность установки трехкомпонентных датчиков ускорений при испытаниях мобильных машин.

Ключевые слова – ускорения мобильных машин, монтажная погрешность, датчик, тестовый сигнал, математическое моделирование, угловые отклонения осей системы координат автомобиля.

Постановка проблемы. Монтажная погрешность установки датчиков оказывает существенное влияние на точность измерения ускорений. Для повышения точности измерений необходимо вводить поправки на положения датчиков относительно системы координат мобильной машины. В настоящей статье определены выражения для расчета поправок позволяющие в автоматическом режиме при проведении измерений уточнить положения осей.

Анализ последних исследований. С каждым годом в мире существенно увеличивается производство автомобилей, их технологический уровень и, вместе с этим, повышаются требования к системам безопасности [1].

Использование датчиков инерции, так называемых акселерометров, играет значительную роль в решении указанных проблем. В ХНАДУ О. П. Алексеевым предложен микропроцессорный комплекс [2], основанный на использовании метода косвенных измерений динамики транспортного средства с помощью датчиков ускорения.

Творческим коллективом кафедр «Технологии машиностроения и ремонта машин» ХНАДУ под руководством проф. Подригало М.А. и «Тракторы и автомобили» ХНТУСХ под руководством проф. Лебедева А.Г. предложен новый метод исследования динамики машин – метод парциальных ускорений. В монографии [3] приведены примеры использования метода при проведении динамических (квалиметрических) испытаний мобильных машин.

В работах [4, 5] исследована динамика изменения параметров в процессе тарировки датчиков линейных ускорений для быстрой проверки чувствительности разработанного мобильного контрольно-измерительного комплекса перед началом дорожных испытаний колесных машин. Автором работы [6] разработана методика определения угла продольного наклона автомобиля, а также уклона дороги при проведении динамических (квалиметрических) испытаний. Данная методика значительно снижает погрешность при записи траектории колесной машины, а также испытаниях на дороге с неровностями или неравномерным уклоном. Автор работы [7] сформулировал основы формирования бортовой контрольно-измерительной системы для проведения динамических испытаний колесных машин, что позволило разработать программное обеспечение для обработки полученных с датчиков сигналов.

В работе [8] предложена система для определения параметров движения автотранспортных средств (АТС) при динамических (квалиметрических) испытаниях, которая состоит из элементов измерения, устройств обработки и визуализации информации. Особенностью системы является то, что определение параметров движения осуществляют одновременно двумя датчиками ускорений, причем датчики ускорений измеряют ускорение АТС в продольной, поперечной и вертикальной плоскостях, информацию о параметрах движения АТС в этих плоскостях получают путем математической обработки без применения интегрирования сигналов с датчиков ускорений.

В работе [9] предложены способ и конструкция снижения вертикальных ускорений, определяющая динамические нагрузки и повышающая поперечную устойчивость колесных машин с шарнирно-сочлененной рамой.

Однако в известных работах отсутствует метод введения автоматической поправки на неточность установки датчиков ускорений относительно осей средств транспорта. Данный вопрос весьма актуален при проведении испытаний на неровной дороге и требует дальнейшего исследования.

Формулирование целей работы. Целью работы является снижение монтажных погрешностей датчиков ускорений корректировкой отклонений их сигналов в устройстве обработки и визуализации информации.

Для достижения поставленной цели необходимо путем математического моделирования установить зависимости ускорений от угловых отклонений осей системы координат автомобиля и разработать методику введения автоматической поправки на неточность установки датчиков ускорений на средствах транспорта.

Основная часть. Разработка методики введения автоматической поправки на неточность установки датчиков ускорений.

При монтаже оси датчиков устанавливаются по величинам сигналов:

- ось OZ – сигнал $a_z=g$;
- ось OX – сигнал $a_x=0$;
- ось OY – сигнал $a_y=0$,

где g – ускорение свободного падения, $g=9,81$ м/с²;

a_x ; a_y ; a_z – значения линейных ускорений по координатным осям, м/с².

Однако сам автомобиль может находиться на опорной площадке, положение которой отлично от горизонтального. Поэтому необходимо ввести автоматическую поправку на отклонения сигналов датчиков ускорений по координатным осям, вызванное несоответствием их направлений направлениям осей автомобиля.

Предположим, что в продольной плоскости автомобиля система координат датчиков XOZ повернута относительно системы координат X_1OZ_1 , связанной с автомобилем на угол α (рис. 1а). В поперечной плоскости автомобиля система координат датчиков YOZ повернута относительно системы координат Y_1OZ_1 , связанной с автомобилем на угол β (рис. 1б).

В плоскости дороги система координат датчиков YOZ повернута относительно системы координат автомобиля Y_1OZ_1 на угол χ . При повороте по часовой стрелке системы координат автомобиля относительно системы координат датчиков углы α , β , χ считаются отрицательными, а против часовой стрелки – положительными (рассматриваются положительные направления координатных осей).

Определение углов α , β , χ возможно при трогании с места, путем создания тестовых сигналов: a_{x0} (рис. 1а), a_{y0} (рис. 1б), a_{z0} (рис. 1в). Тестовый сигнал a_{x0} создается при трогании автомобиля с места, a_{y0} – поворотом рулевого колеса в одну из сторон после трогания автомобиля с места. Углы поворота системы координат датчиков относительно системы координат автомобиля определяются по величинам тестовых сигналов

$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta a_{z0}}{a_{x0}}\right) = \arctg\left(\frac{a_{z0} - g}{a_{x0}}\right); \quad (1)$$

$$\beta = \arctg\left(\frac{\Delta a_{z0}}{a_{y0}}\right) = \arctg\left(\frac{a_{z0} - g}{a_{y0}}\right); \quad (2)$$

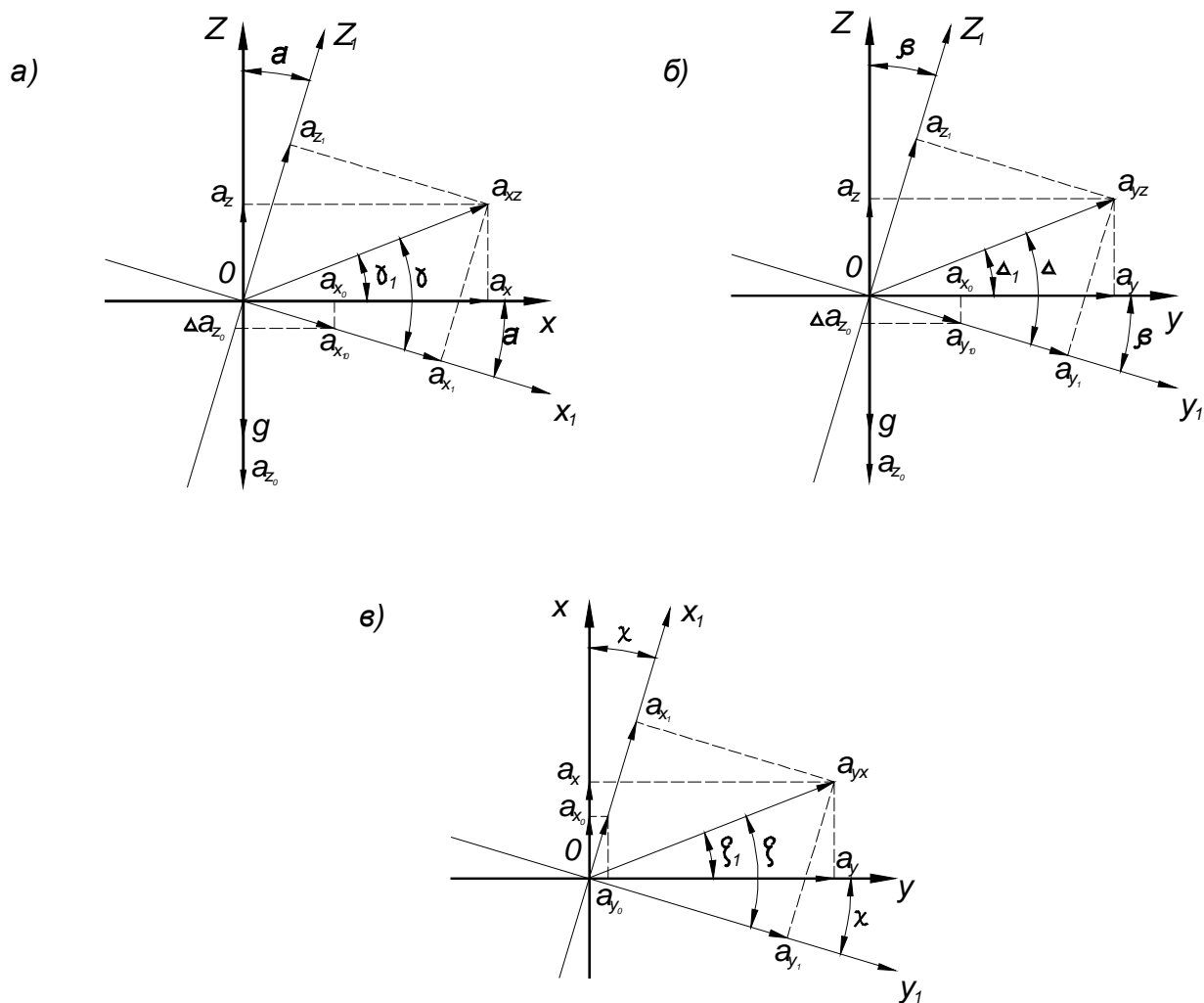


Рис.1. Определение взаимосвязи между координатами в: а – продольной плоскости; б – поперечной плоскости; в – горизонтальной плоскости.

$$\chi = \arctg\left(\frac{a_{y0}}{a_{x0}}\right) \tag{3}$$

Предположим, что система координат датчиков смещена относительно системы координат автомобиля только в продольной плоскости на угол α . При этом $\beta=0$ и $\chi=0$. В этом случае (см. рис. 1а).

$$\alpha_{xz}^2 = a_{z1}^2 + a_{x1}^2 = a_z^2 + a_x^2; \tag{4}$$

$$\frac{a_z}{a_x} = tg\gamma; \tag{5}$$

$$\frac{a_{z1}}{a_{x1}} = tg\gamma_1; \tag{6}$$

$$\gamma_1 = \gamma - \alpha. \tag{7}$$

Уравнение (4) приводим к виду

$$a_{x1}^2 \left(1 + \frac{a_{z1}^2}{a_{x1}^2}\right) = a_x^2 \left(1 + \frac{a_z^2}{a_x^2}\right); \quad (8)$$

Откуда получим

$$a_{x1} = a_x \sqrt{\frac{1 + \frac{a_z^2}{a_x^2}}{1 + \frac{a_{z1}^2}{a_{x1}^2}}} = a_x \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \operatorname{tg}^2 (\gamma - \alpha)}} = a_x \frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos \gamma} = \quad (9)$$

$$= a_x \cos \alpha \left(1 + \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg} \alpha\right) = a_x \cdot \delta_x$$

где δ_x – поправка на величину показаний датчика, ориентированного по оси ОХ

$$\delta_x = \cos \alpha \left(1 + \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg} \alpha\right). \quad (10)$$

Очевидно, что (см. уравнение (6))

$$a_{z1} = a_{x1} \cdot \operatorname{tg} \gamma_1 = a_{x1} \operatorname{tg} (\gamma - \alpha) = a_{x1} \frac{\frac{a_z}{a_x} - \operatorname{tg} \alpha}{1 + \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg} \alpha}. \quad (11)$$

Подставляя (9) в (11), получим

$$a_{z1} = a_z \cos \alpha \left(1 - \frac{a_x}{a_z} \operatorname{tg} \alpha\right) = a_z \cdot \delta_z, \quad (12)$$

где δ_z – поправка на величину датчика, ориентированного по оси ОZ

$$\delta_z = \cos \alpha \left(1 - \frac{a_x}{a_z} \operatorname{tg} \alpha\right). \quad (13)$$

Проведя аналогичные преобразования, получим при $\beta \neq 0$; $\alpha = 0$; $\chi = 0$ (в поперечной плоскости)

$$a_{y1} = a_y \cos \beta \left(1 + \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg} \beta\right) = a_y \cdot \delta_y; \quad (14)$$

$$a_{z1} = a_z \cos \beta \left(1 - \frac{a_y}{a_z} \operatorname{tg} \beta\right) = a_z \cdot \delta_z; \quad (15)$$

$$\delta_y = \cos \beta \left(1 + \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg} \beta\right); \quad (16)$$

$$\delta_z = \cos \beta \left(1 - \frac{a_y}{a_z} \operatorname{tg} \beta\right). \quad (17)$$

В горизонтальной плоскости $\chi \neq 0$; $\alpha = 0$; $\beta = 0$

$$a_{y1} = a_y \cos \chi \left(1 + \frac{a_x}{a_y} \operatorname{tg} \chi\right) = a_y \cdot \delta_y; \quad (18)$$

$$a_{x1} = a_x \cos \chi \left(1 - \frac{a_y}{a_x} \operatorname{tg} \chi\right) = a_x \cdot \delta_x. \quad (19)$$

Рассмотрим общий случай при $\alpha \neq 0$; $\beta \neq 0$; $\chi \neq 0$. В этом случае справедливо равенство

$$a_x^2 + a_y^2 + a_z^2 = a_{x1}^2 + a_{y1}^2 + a_{z1}^2 \quad (20)$$

Из выражения (20) определим

$$a_{x1} = a_x \sqrt{\frac{1 + \frac{a_y^2}{a_x^2} + \frac{a_z^2}{a_x^2}}{1 + \frac{a_{y1}^2}{a_{x1}^2} + \frac{a_{z1}^2}{a_{x1}^2}}} = a_x \sqrt{\frac{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \xi} + \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \xi_1} + \operatorname{tg}^2 \gamma_1}} \quad (21)$$

Учитывая соотношения (5), (6) и (7), а также (см. рис. 1в)

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{a_x}{a_y}; \quad (22)$$

$$\operatorname{tg} \xi_1 = \frac{a_{x1}}{a_{y1}}; \quad (23)$$

$$\xi_1 = \xi - \chi, \quad (24)$$

получим

$$a_{x1} = a_x \sqrt{\frac{1 + \frac{a_y^2}{a_x^2} + \frac{a_z^2}{a_x^2}}{1 + \left(\frac{1 + \frac{a_x}{a_y} \operatorname{tg} \chi}{\frac{a_x}{a_y} - \operatorname{tg} \chi}\right)^2 + \left(\frac{1 + \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg} \alpha}{\frac{a_z}{a_x} - \operatorname{tg} \alpha}\right)^2}} = a_x \delta_x. \quad (25)$$

Из выражения (20) также определим

$$a_{y1} = a_y \sqrt{\frac{1 + \frac{a_x^2}{a_y^2} + \frac{a_z^2}{a_y^2}}{1 + \frac{a_{x1}^2}{a_{y1}^2} + \frac{a_{z1}^2}{a_{y1}^2}}} = a_y \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \xi + \operatorname{tg}^2 \Delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \xi_1 + \operatorname{tg}^2 \Delta_1}}. \quad (26)$$

Учитывая соотношения (22) – (24), а также (см. рис. 1б)

$$\operatorname{tg} \Delta = \frac{a_z}{a_y}; \quad (27)$$

$$\operatorname{tg}\Delta_1 = \frac{a_{z1}}{a_{y1}}; \quad (28)$$

$$\Delta_1 = \Delta - \beta, \quad (29)$$

получим

$$a_{y1} = a_y \frac{\sqrt{1 + \frac{a_x^2}{a_y^2} + \frac{a_z^2}{a_y^2}}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{a_x}{a_y} - \operatorname{tg}\chi\right)^2}{1 + \frac{a_x}{a_y} \operatorname{tg}\chi} + \frac{\left(\frac{a_z}{a_y} - \operatorname{tg}\beta\right)^2}{1 + \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg}\beta}}} = a_y \delta_y. \quad (30)$$

Из выражения (20) определим

$$a_{z1} = a_z \frac{\sqrt{1 + \frac{a_x^2}{a_z^2} + \frac{a_y^2}{a_z^2}}}{\sqrt{1 + \frac{a_{x1}^2}{a_{z1}^2} + \frac{a_{y1}^2}{a_{z1}^2}}} = a_z \frac{\sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\gamma} + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\Delta}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\gamma_1} + \frac{1}{\operatorname{tg}^2\Delta_1}}}. \quad (31)$$

Учитывая соотношения (5) – (7) и (27) – (29), получим окончательно

$$a_{z1} = a_z \frac{\sqrt{1 + \frac{a_x^2}{a_z^2} + \frac{a_y^2}{a_z^2}}}{\sqrt{1 + \frac{\left(1 + \frac{a_z}{a_x} \operatorname{tg}\alpha\right)^2}{\frac{a_z}{a_x} - \operatorname{tg}\alpha} + \frac{\left(1 + \frac{a_z}{a_y} \operatorname{tg}\beta\right)^2}{\frac{a_z}{a_y} - \operatorname{tg}\beta}}} = a_z \delta_z. \quad (32)$$

Таким образом, полученные зависимости позволяют вводить автоматическую поправку на неточность установки датчиков ускорений относительно осей средств транспорта при проведении дорожных испытаний.

Выводы. Путем математического моделирования установлены зависимости ускорений от угловых отклонений осей системы координат автомобиля, позволяющие вводить автоматическую поправку на неточность установки датчиков ускорений относительно осей средств транспорта.

Полученные уравнения позволяют количественно оценить величину ошибки при установке датчиков ускорений на средствах транспорта.

Литература.

1. *Аш Ж.* Датчики измерительных систем: В 2 книгах / *Аш Ж.* [пер. с франц.] – М.: Мир, 1992. – 480 с.
2. *Гаврилов Э. В.* Принципы работы мобильных вычислительных комплексов / *Алексеев О.П., Смирнов О.П.* // Информационные технологии. – Харьков: Магдебург. – ХГПУ, 1999. – с.139 – 141.
3. *Артемов Н.П., Лебедев А.Т., Подригало М.А., Полянский А.С., Клец Д.М., Коробко А.И., Задорожня В.В.* Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин. Монография / под ред. проф. *Подригало М.А.* – Харьков: «Міськдрук», 2012. – 220 с.
4. *Клец Д.М.* Градуировка акселерометров методом постоянного ускорения // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво).* – Вип. 2 (32), т. 1. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – с. 87 – 92.
5. *Клец Д.М.* Определение угла продольного наклона автомобиля при проведении динамических испытаний // *Транспортне машинобудування: збірник наукових праць / Д.М. Клец.* – Харків: НТУ «ХП», 2011. – № 18 – с. 24 – 29.
6. *Клец Д.М.* Разработка мобильного регистрационно-измерительного комплекса для проведения динамических испытаний колесных машин / *Д.М. Клец* // *Вісник Національного транспортного університету. Науково-технічний збірник.* – К.: НТУ, 2012. – Випуск 25, с. 234 – 241
7. Пат. 51031 Україна, МПК G01P 3/00 25.06.2010. Система для визначення параметрів руху автотранспортних засобів при динамічних (кваліметричних) випробуваннях / *Подригало М. А., Коробко А.И., Клец Д. М., Файст В.Л.*; заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. університет. - № u 2010 01136; заявл. 04.02.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.
8. *Подригало М. А.* Метрологічне забезпечення динамічних випробувань тягово-транспортних машин / *М.А. Подригало, А.І. Коробко, Д.М. Клец, В.І. Гацько* // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. Тракторна енергетика в рослинництві.* – 2009. – Вип. 89. – С. 87 – 99.
9. Снижение динамических нагрузок колесных машин с шарнирно-сочленённой рамой и использованием электронных систем *М.А. Подригало, А.С. Полянский, Е.А. Дубинин, Д.М. Клец, В.В. Задорожня* // *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Механізація сільськогосподарського виробництва.* 2012 – Вип. 124, Том 2 – с.149 – 153.

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕНЬ
МОБІЛЬНИХ МАШИН ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ МОНТАЖНОЇ
ПОХИБКИ ДАТЧИКІВ**

*Подригало М.А., Полянський О.С., Клець Д.М., Дубінін Є.О.,
Артьомов М.П., Задорожня В.В.*

Анотація – отримані вирази для розрахунку уточнень на неточність установки трикомпонентних датчиків прискорень при випробуваннях мобільних машин.

**ENHANCE THE ACCURACY OF MOBILE MACHINES
ACCELERATED BY LESS INSTALLATION SENSOR ERROR**

*M. Podrigalo, A. Polyanski, D. Klets, E. Dubinin, N. Artyomov,
V. Zadorozhnyaya*

Summary

Expressions for the calculation of the corrections for the installation of three-component sensors inaccuracy acceleration of mobile machines test are obtained.