

Подригало<sup>1</sup> М.А., Артёмов<sup>2</sup> Н.П., Клец<sup>3</sup> Д.М.<sup>1</sup>Национальная академия Национальной гвардии Украины<sup>2</sup>Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П. Василенко<sup>3</sup>Харьковский университет воздушных сил им. И. Кожедуба**ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ**

Предложена методика оценки неопределенности измерения линейных ускорений мобильным регистрационно-измерительным комплексом. Суммарная неопределенность подчиняется закону нормального распределения, для которого определены математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение.

**Ключевые слова:** акселерометр, неопределенность, динамические испытания, колесная машина.

**Введение.** В процессе квалитетических испытаний автотранспортных средств акселерометры широко используются при оценке аэродинамических и тягово-скоростных качеств, тормозных качеств, управляемости и устойчивости, плавности хода, шума и вибрации, надежности, пассивной безопасности и т.д. [2]. Воздействие внешних возмущений, а также необходимость снижения погрешностей приводят к необходимости подтверждать результаты заводской градуировки акселерометров и проводить повторную градуировку через заданные интервалы времени [6].

**Анализ публикаций.** В работе [1] предложена система для определения параметров движения автотранспортных средств при динамических (квалитетических) испытаниях. Указанная система лежит в основе авторского мобильного регистрационно-измерительного комплекса (МРИК), чувствительными элементами которого являются трёхосевые акселерометры.

В работе [3] исследована динамика изменения параметров в процессе тарировки датчиков линейных ускорений для быстрой проверки чувствительности разработанного мобильного регистрационно-измерительного комплекса систем сельскохозяйственных машинно-тракторных агрегатов при выполнении почвообрабатывающих операций.

Однако в известных работах не выполнена оценка неопределенности измерения линейных ускорений мобильным регистрационно-измерительным комплексом, данный вопрос требует дополнительных исследований.

**Цель и задачи исследования.** Целью статьи является разработка методики оценки неопределенности измерения линейных ускорений акселерометрами мобильного регистрационно-измерительного комплекса.

Для достижения указанной цели необходимо выполнить градуировку акселерометров и провести статистическую обработку полученных результатов с использованием теории неопределенности измерений.

**Изложение основного материала.** В 2003 г. Украина присоединилась к международному соглашению СИМ МРА, что обуславливает необходимость перехода к новой системе обеспечения единства измерения [4]. Указанное соглашение предполагает оценку неопределенности типа *A* и *B* при выполнении градуировки и измерений. Для оценки неопределенности и проверки адекватности показаний использованных акселерометров модели ММА–7260QT выполнена градуировка на специальном вибростенде. При проведении градуировки датчиков использована измерительная аппаратура, приведенная в табл. 1. В табл. 2 приведены условия проведения поверки указанных акселерометров.

Таблица 1. Средства измерительной техники для проведения поверки акселерометров ММА–7260QT

№	Наименование измерительного средства
1	Мегаомметр М4100/3, номинальное напряжение 500 В
2	Эталонная вибрационная установка 2 разряда с диапазоном частот от 5 до 500 Гц, амплитудой виброперемещения до 1000 мкм (вибростенд ВЭД–10)
3	Осциллограф типа С1–83 или С1–55
4	Генератор сигналов специальной формы Г6–26
5	Частотомер ЧЗ–33
6	Усилитель мощности У4.2
7	Источник питания ЛИПСИ–50
8	Измеритель вибрации ИВПА–07 с датчиком ММА 7160

Таблица 2. Условия проведения поверки акселерометра MMA-7260QT

№	Наименование	Значение
1	Температура окружающего воздуха, °С	$20^{+5}_{-2}$
2	Влажность окружающей среды, %	30 – 80
3	Атмосферное давление, кПа (мм. рт. ст.)	86 – 106,7 (630 – 800)
4	Напряжение питающей сети, В	$220 \pm 4,4$
5	Частота сети питания, Гц	$50,0 \pm 0,5$
6	Отсутствие электрических и магнитных полей, внешней вибрации и тряски, которые могут повлиять на результаты поверки.	

Процесс снятия показаний с испытуемых датчиков и вибростенда приведен на рис. 1 и рис. 2. Неопределенность измерения акселерометра определим на частоте колебаний 10 Гц при пяти значениях виброскорости, равномерно распределённых по рабочему диапазону.



Рис. 1. Снятие показаний с датчиков ускорений MMA7260QT на вибростенде  
а – внешний вид вибростенда; б – вспомогательная аппаратура

Значения амплитуд виброскорости выбирались в пределах от 2,5 до 20 мм/с. При каждом воспроизводимом значении виброскорости в протокол испытаний вносились показания испытываемого акселерометра и эталонного датчика. По осциллографу на ноутбуке регистрировали значения сигнала акселерометра.

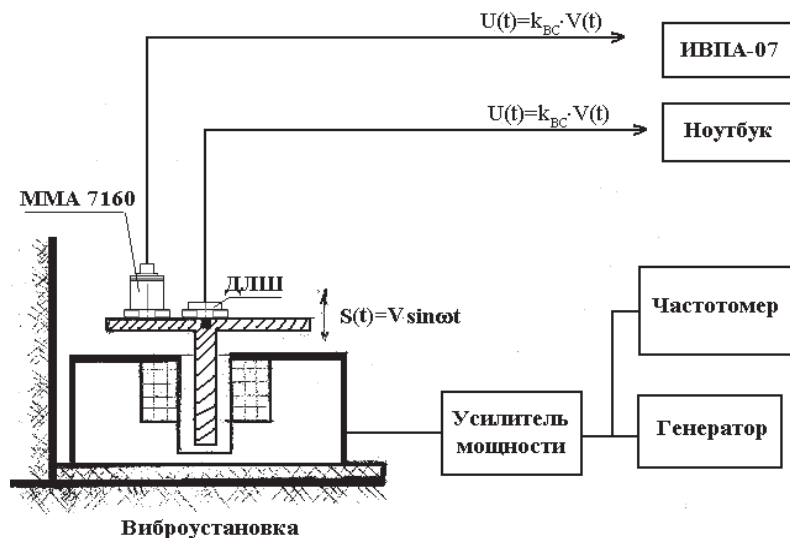


Рис. 2. Схема стенда для проведения испытаний

Определим расширенную неопределенность типа *A* измерения датчиками MMA7260QT линейных ускорений в вертикальной плоскости. После *n*-кратных измерений датчиком максимальной величины  $\dot{V}_{Z\max}$  (см. рис. 3) определим  $u_A(\overline{\dot{V}_Z})$  как стандартное отклонение экспериментальных значений от среднего арифметического  $\overline{\dot{V}_Z} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{V}_{Zi}$  с помощью следующей зависимости [5]

$$u_A(\overline{\dot{V}_Z}) = t_{v,\beta} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\dot{V}_{Zi} - \overline{\dot{V}_Z})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (1)$$

где  $t_{v,\beta}$  – коэффициент Стьюдента;  
*v* – число независимых отклонений,  $v = n - 1$ ;  
 $\beta$  – доверительная вероятность.

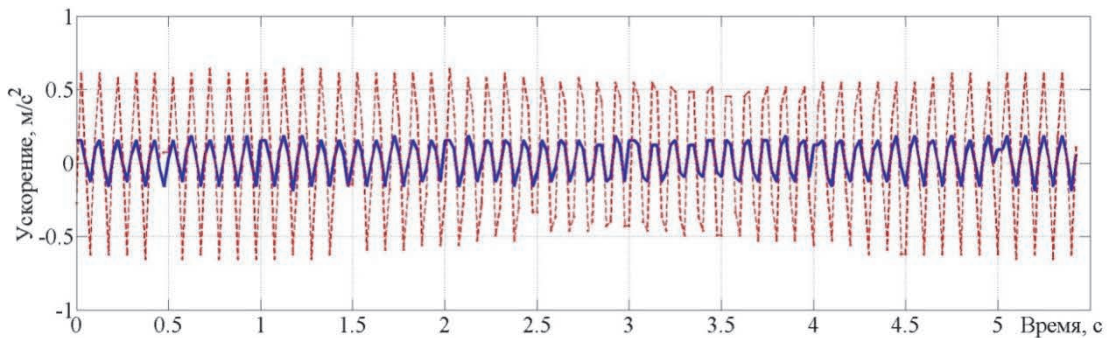
Расширенную неопределенность типа *B*, обусловленную разрешенной предельной ошибкой измерительного инструмента (предполагающей нормальное распределение погрешности инструмента и ее соответствие  $3\sigma$ ), с доверительной вероятностью  $\beta$  найдем с помощью выражения [5] **Помилка! Закладку не визначено.**

$$u_B(\dot{V}_Z)_m = t_{v,\beta} \cdot \frac{x_i}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

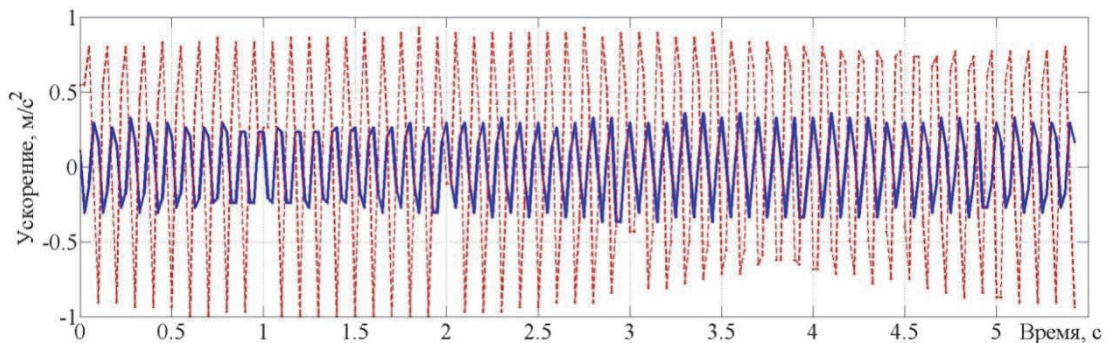
где  $x_i$  – разрешенная предельная погрешность измерительного прибора,  $x_i = \pm 0,01 \cdot \overline{\dot{V}_Z}$ .

При прямых повторных измерениях суммарную неопределенность находим следующим образом

$$u_C(\dot{V}_Z) = \sqrt{u_A^2(\overline{\dot{V}_Z}) + u_B^2(\dot{V}_Z)_m}. \quad (3)$$



а)



б)

а – виброскорость = 2,5 мм/с и 7,5 мм/с,  $\dot{V}_{Z\max} = \pm 0,22 \text{ м/с}^2$  и  $\pm 0,66 \text{ м/с}^2$ ;

б – виброскорость = 5 мм/с и 10 мм/с,  $\dot{V}_{Z\max} = \pm 0,44 \text{ м/с}^2$  и  $\pm 0,88 \text{ м/с}^2$

Рис. 3. Показания датчика MMA7260QT в процессе работы стенда

Подставляя в зависимость (3) выражения (1) и (2) получим суммарную неопределенность измерения линейных ускорений мобильным регистрационно-измерительным комплексом

$$u_c(\dot{V}_Z) = t_{v,\beta} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\dot{V}_{Z_i} - \overline{\dot{V}_Z})^2}{n \cdot (n-1)}} + \frac{x_i^2}{3}. \quad (4)$$

Расчетные изменения неопределенностей стандартного отклонения экспериментальных значений линейных ускорений от среднего арифметического по осям координат контролируемого датчика занесены в табл. 3.

Таблица 3. Оценка неопределенности измерения линейных ускорений датчиками MMA7260QT

$\overline{\dot{V}_Z}, \text{ м/с}^2$	$u_A(\overline{\dot{V}_Z}), \text{ м/с}^2$	$u_B(\overline{\dot{V}_Z})_m, \text{ м/с}^2$	$u_c(\overline{\dot{V}_Z}), \text{ м/с}^2$
0,9073	0,0085	0,0059	0,0104
0,8144	0,0159	0,0053	0,0167
0,5831	0,0318	0,0038	0,0320
0,2992	0,0109	0,0020	0,0111
0,1558	0,0041	0,0010	0,0043

Проанализировав результаты неопределенности измерения линейных ускорений датчиками MMA7260QT, которые приведены в табл. 3 приходим к выводу, что суммарная неопределенность подчиняется закону нормального распределения.

Закон нормального распределения неопределенности измерения линейных ускорений датчиками MMA7260QT показан на рис. 4.

Анализ рис. 4 показал, что математическое ожидание указанного закона составляет 0,015 м/с<sup>2</sup>, а среднее квадратичное отклонение 0,01 м/с<sup>2</sup>. Максимальная величина суммарной неопределенности при этом составляет 0,032 м/с<sup>2</sup>.

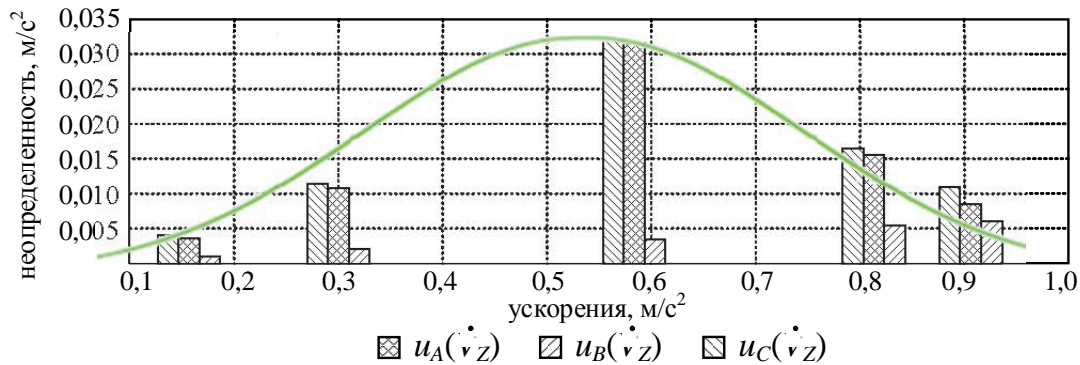


Рис. 4. Неопределенность измерений линейных ускорений

**Выводы**

1. Разработанная методика позволяет оценивать неопределенность измерения линейных ускорений мобильным регистрационно-измерительным комплексом перед проведением динамических и кваліметрических испытаний колесных машин.

2. Суммарная неопределенность подчиняется закону нормального распределения, математическое ожидание которого для датчиков MMA7260QT составляет 0,015 м/с<sup>2</sup>, а среднее квадратичное отклонение 0,01 м/с<sup>2</sup>. Максимальная величина суммарной неопределенности составляет 0,032 м/с<sup>2</sup>.

1. Пат. 51031 Україна, МПК G01P 3/00. 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 ХНАДУ. – № u 2010 01136; заявл. 04.02.10 ; опубл. 25.06.10, Бюл. № 12.



2. Метод парциальных ускорений и его приложения в динамике мобильных машин / [Артемов Н. П., Лебедев А. Т., Клец Д. М. и др.]. – Х. : Миськдрук, 2012. – 220 с.
3. Артьомов М. П. Динамічні випробування датчиків прискорень на лабораторному вібростенді / М. П. Артьомов, Д. М. Клец // Вібрації в техніці і технологіях. – Вінниця, 2012. – № 2 (66). – С. 5–9.
4. Паракуда В. В. Еволюція вимог до метрології / В. В. Паракуда, Б. Д. Колпак, В. П. Чалий // Укр. метролог. журн. – 2005. – № 3. – С. 56–60
5. Измерение физических величин. Неопределенности измерения, погрешности измерения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://parsek.yf.ttu.ee/inst/praktikumid>.
6. Клец Д. М. Оценка чувствительности акселерометров бортовой контрольно–измерительной системы автомобиля / Д. М. Клец // Актуальні проблеми технічного забезпечення внутрішніх військ МВС України : наук.–практ. семінар, 25 квітня 2012 р. : тези доп. – Х., 2012. – С. 31–33.

## REFERENCES

1. Podryhalo, M., Korobko, A., Klets, D. & Faist, V. (2010). *The system for determining parameters of vehicles movement during dynamic (qualimetric) tests*. Patent UA 51031 № u 2010 01136.
2. Artemov, N., Lebedev, A. & Klets, D. (2012). *The method of partial accelerations and its applications in the dynamics of mobile machines*. Kharkiv, Miskdruk Publ., 220 p.
3. Artemov, N. & Klets, D. (2012). Dynamic tests of acceleration sensors on vibration laboratory bench. *The vibrations in engineering and technology*. [Vibratsii v tekhnitsi i tekhnolohiiakh]. Vol. 2. Vinnitsa, pp. 5-9.
4. Parakuda, V., Kolpak, B. & Chalvi V. (2005). The evolution of metrology requirements. *Ukrainian metrological magazine*. [Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal]. Vol. 3. Pp. 56-60.
5. Measurement of physical quantities. Measurement uncertainty, measurement errors. Available at: <http://parsek.yf.ttu.ee/inst/praktikumid> (accessed 03.06.2015).
6. Klets, D. (2012). Evaluation of the sensitivity of accelerometers of onboard control and measuring system of the car. *Actual problems of technical providing of Interior Ministry troops of Ukraine*. [Aktualni problemy tekhnichnoho zabezpechennia vnutrishnikh viisk MVS Ukrainy]. Kharkiv, pp. 31-33.

**М. А. Подригало, М. П. Артьомов, Д. М. Клец. Оцінка невизначеності вимірювання лінійних прискорень.**

Запропонована методика оцінки невизначеності вимірювання лінійних прискорень мобільним реєстраційно-вимірювальним комплексом. Сумарна невизначеність підкоряється закону нормального розподілу, для якого визначено математичне очікування та середнє квадратичне відхилення.

**Ключові слова:** акселерометр, невизначеність, динамічні випробування, колісна машина.

**M. Podrygalo, N. Artiomov, D. Klets. Evaluation of linear acceleration measurement uncertainty.**

A method for estimating of linear acceleration measurement uncertainty by mobile-registration measurement system is offered. Combined uncertainty obeys the normal distribution, for which the expectation and standard deviation is evaluated.

**Keywords:** accelerometer, uncertainty, dynamic testing, wheeled vehicle.

## АВТОРИ:

**ПОДРИГАЛО Михайло Абович**, доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедри технології машинобудування і ремонту машин, Харків, Україна.

**АРТЬОМОВ Микола Петрович**, доктор технічних наук, професор кафедри «Тракторів і автомобілів», Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка, Харків, Україна.

**КЛЕЦ Дмитрій Михайлович**, доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів і транспортної інфраструктури, Харків, Україна, e-mail: [d.m.klets@gmail.com](mailto:d.m.klets@gmail.com)

## AUTHORS:

**Mikhailo PODRIGALO**, Doctor of Science in Engineering, Professor, Head of the Mechanical Engineering Technology and Repair of Machines Department, Kharkiv, Ukraine.

**Nikolay ARTEMOV**, Doctor of Science in Engineering, Professor of the Department "Tractors and cars", Kharkiv, National Technical University of Agriculture them. Peter Vasilenko, Kharkiv, Ukraine.

**Dmitri KLETS**, Doctor of Science in Engineering, Professor of Cars and Transport Infrastructure Department, Kharkiv, Ukraine, e-mail: [d.m.klets@gmail.com](mailto:d.m.klets@gmail.com)