

УДК 006.91:620.17

М. А. Бондарь, М. А. Волошина, Л. А. Ерес, И. М. Курако, О. Д. Морозов

## РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОСПРОИЗВОДИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АТТЕСТАЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МАШИН

Действующие документы в сфере метрологического обеспечения предписывают оценивать неопределенность измерений. Так как в Украине отсутствует регламентированная методика расчета неопределенности при аттестации испытательного оборудования, в данной статье предложена методика расчета неопределенности измерений при аттестации центробежной машины, которая используется для воспроизведения с требуемой точностью заданного значения линейного ускорения, постоянно действующего на вращающийся вместе с ротором испытуемый узел. Предложенная методика применима для центробежных машин, для которых значения воспроизводимых линейных ускорений определяются по результатам измерения угловой скорости вращения ротора центробежной машины и радиального расстояния от продольной оси ротора до заданной точки испытуемого узла. В качестве исходных данных используются результаты наблюдений, получаемые при многократных воспроизведениях требуемых значений линейных ускорений, а также значения погрешности или неопределенностей измерений средств измерительной техники, используемых при проведении контроля угловой скорости вращения и радиального расстояния с учетом вклада каждого из измеряемых параметров в определенное значение линейного ускорения. Приведенный в статье расчет дает оценку интервала значений линейных ускорений, которые с установленной вероятностью могут быть обоснованно приписаны воспроизводимому при аттестации центробежной машины заданному значению линейного ускорения. Приведены расчетные формулы для оценки составляющих неопределенности воспроизводимых значений линейных ускорений и даны рекомендации по представлению бюджета неопределенности.

**Ключевые слова:** расширенная неопределенность, стандартная неопределенность, коэффициент чувствительности, вклад неопределенности измерения, частотомер.

Чинні документи у сфері метрологічного забезпечення приписують оцінювати невизначеність вимірювань. Оскільки в Україні немає регламентованої методики розрахунку невизначеності під час атестації випробувального устаткування, у цій статті запропоновано методику розрахунку невизначеності вимірювань під час атестації відцентрової машини, яку використовують для відтворення з необхідною точністю заданого значення лінійного прискорення, що постійно діє на випробуваний вузол, який обертається разом з ротором. Запропонована методика для відцентрових машин, для яких значення відтворюваних лінійних прискорень визначають за результатами вимірювання кутової швидкості обертання ротора відцентрової машини та радіальної відстані від поздовжньої осі ротора до заданої точки випробуваного вузла. Як вихідні дані використано результати спостережень, одержувані під час багаторазових відтворень необхідних значень лінійних прискорень, а також значення похибки або невизначеностей вимірювань засобів вимірювальної техніки, використовуваних під час контролю кутової швидкості обертання та радіальної відстані, враховуючи внесок кожного з вимірюваних параметрів у визначене значення лінійного прискорення. Наведений у статті розрахунок оцінює інтервал значень лінійних прискорень, які з установленною ймовірністю можуть бути обґрунтовано приписані відтворюваному під час атестації відцентрової машини заданому значенню лінійного прискорення. Наведено розрахункові формули для оцінювання відтворюваних значень лінійних прискорень, що становлять невизначеності, і надано рекомендації щодо подання бюджету невизначеності.

**Ключові слова:** розширена невизначеність, стандартна невизначеність, коефіцієнт чутливості, внесок невизначеності вимірювання, частотомір.

Applicable documents on metrological assurance regulate the estimation of measurement uncertainty. In Ukraine there is no regulative methodology for uncertainty calculation when certifying test equipment that causes the necessity of its definition. This article offers the methodology for uncertainty calculation when certifying a centrifugal machine that is used to reproduce precisely the given value of linear acceleration that permanently acts on a tested unit spinning together with a rotor. The offered methodology for uncertainty calculation is applicable to centrifugal machines, for which numerical values of reproducible linear acceleration are determined by results of calculations of the centrifugal machine's rotor angular velocity and radial distance from rotor's longitudinal axis to the given point of the tested unit. Initial data used were results of observation obtained after multiple reproductions of the given values of linear acceleration as well as numer-

ical values of errors and measurement uncertainties of measuring equipment that was used when monitoring the rotary angular velocity and radial distance considering the contribution of each measurable parameter to a certain value of linear acceleration. The calculation given in the article estimates the limit of linear accelerations that can be attributed with established probability to the given value of linear acceleration reproduced when certificating the centrifugal machine. The design formulae are given to estimate the uncertainty components of the reproducible values of linear accelerations and the recommendations are given to present the uncertainty budget.

**Keywords:** extended uncertainty, standard uncertainty, sensitivity coefficient, measurement uncertainty contribution, frequency meter.

## Введение

Испытательное оборудование (ИО) представляет собой техническое устройство, предназначенное для нормированного воспроизведения условий испытаний.

Аттестации подлежит ИО, воспроизводящее нормированные внешние воздействующие факторы и (или) нагрузки. Она проводится с целью определения нормированных точностных характеристик оборудования, их соответствия требованиям нормативно-технической документации и установления пригодности оборудования к эксплуатации [1].

При оценивании точностных характеристик ИО могут использоваться терминология и подходы, связанные как с понятием «неопределенности», так и с понятием «характеристики погрешности» [2]. В настоящей статье изложен подход, связанный с понятием «неопределенности».

## Постановка задачи

В настоящее время в Украине отсутствует национальная нормативная база, в которой была бы определена методология оценивания неопределенности воспроизводимых значений испытательных воздействий при аттестации ИО.

Базовый алгоритм расчета неопределенности измерений при проведении аттестации приведен в [3]. Необходимо также учитывать специфические особенности определения значения воспроизводимого испытательного воздействия.

Для соблюдения требований действующего Закона Украины [4] необходимо проводить оценку погрешности или неопределенности измерений.

Специалисты ГП «КБ «Южное» внедряют понятие «неопределенность» в техническую документацию, предусматривающую

использование средств измерительной техники и ИО. В данной статье представлен расчет расширенной относительной неопределенности воспроизведения линейных ускорений при проведении аттестации центробежных машин.

## Изложение основного материала

Центробежные машины предназначены для проверки способности испытуемого узла противостоять разрушающему действию линейного ускорения и сохранять работоспособность и технические характеристики после (при испытаниях на прочность или устойчивость) или во время действия линейного ускорения, параметры которого указаны в программе испытаний, техническом задании или технических условиях.

Значение линейного ускорения, направление и продолжительность его воздействия, характер изменения оговариваются в технических условиях и программах испытаний узлов. Выбор параметров линейного ускорения зависит от назначения испытуемого узла, места его установки на изделии и условий эксплуатации. Определяющими при выборе параметров линейного ускорения являются требования к прочностным характеристикам испытуемого узла и стабильность его контролируемых параметров [5].

Испытуемый узел закрепляют на роторе центробежной машины при помощи специальной оснастки. Для уравнивания ротора при его вращении закрепляют эквивалентный противовес на противоположной стороне ротора.

Структурная схема воспроизведения используемой на ГП «КБ «Южное» центробежной машиной заданных значений линейных ускорений приведена на рис. 1.

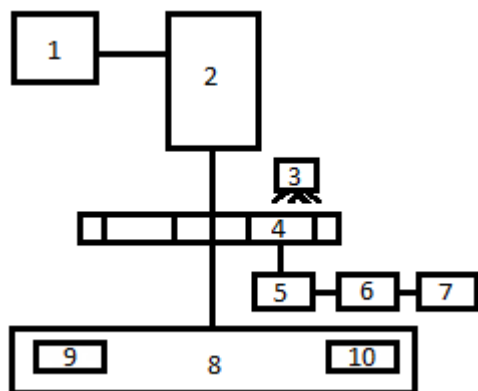


Рис. 1. Структурная схема:  
 1 – пульт управления; 2 – электрический двигатель;  
 3 – источник света; 4 – диск-модулятор с 60  
 отверстиями; 5 – фотоприемник; 6 – плата форми-  
 рования импульсов; 7 – частотомер; 8 – ротор;  
 9 – испытуемый узел; 10 – противовес

Линейное ускорение  $a$  в заданной точке места установки испытуемого узла воспроизводится путем задания требуемого количества  $n$  оборотов ротора центробежной машины в минуту с помощью электрического двигателя, измеряемого с помощью частотомера благодаря тому, что конструктивное исполнение измерительного канала количества оборотов ротора в минуту  $n$  обеспечивает получение выходного сигнала частотой 1 Гц при скорости вращения ротора 1 об/мин. Предварительно определяется расстояние  $R$  от оси вращения ротора до заданной точки места установки испытуемого узла.

Значение линейного ускорения для рассматриваемой схемы определяется по формуле

$$a = \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2 R, \quad (1)$$

где  $a$  – линейное ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $n$  – количество оборотов ротора центробежной машины в минуту;  $R$  – измеряемое радиальное расстояние, м.

Для расчета расширенной относительной неопределенности воспроизводимых линейных ускорений задается не менее пяти раз количество оборотов ротора в минуту, определяемое из (1). Результаты экспериментальных исследований подлежат исправлению путем внесения поправок. Процедура внесения поправок приведена в [6].

Стандартная неопределенность по типу А (определяемая как среднее квадратическое

отклонение среднего арифметического значения результатов измерений), обусловленная разбросом показаний частотомера при выполнении многократных измерений,

$$u_A(\bar{n}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{m \cdot (m-1)}},$$

где  $m$  – количество результатов наблюдений;  $a_j$  – исправленный результат  $i$ -того измерения;  $\bar{a}$  – исправленное среднее арифметическое значение результатов измерений.

Стандартная неопределенность по типу В (определяемая любым другим способом) частотомера  $u_B(n)$  вычисляется по формуле (2) или (3) в зависимости от имеющихся исходных данных

$$u_B(n) = \frac{U_{fr}}{k}; \quad (2)$$

$$u_B(n) = \frac{\Delta_{fr}}{\sqrt{3}}, \quad (3)$$

где  $U_{fr}$  – значение расширенной неопределенности частотомера (из сертификата его калибровки);  $k$  – коэффициент охвата при доверительной вероятности  $P = 0,95$  (из сертификата калибровки);  $\Delta_{fr}$  – абсолютная погрешность частотомера.

Стандартная неопределенность по типу В измерителя радиального расстояния  $u_B(R)$  вычисляется по формуле (4) или (5)

$$u_B(R) = \frac{U_r}{k}; \quad (4)$$

$$u_B(R) = \frac{\Delta_r}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где  $U_r$  – значение расширенной неопределенности измерителя радиального расстояния (из сертификата его калибровки);  $\Delta_r$  – абсолютная погрешность измерителя радиального расстояния.

Стандартная неопределенность по типу В, обусловленная дискретностью  $d_1$  показаний частотомера  $u_{Bd}(n)$ ,

$$u_{Bd}(n) = \frac{d_1}{2\sqrt{3}}.$$

Стандартная неопределенность по типу В, обусловленная ценой деления  $d_2$  измерителя радиального расстояния  $u_{Bd}(R)$ ,

$$u_{Bd}(R) = \frac{d_2}{2\sqrt{3}}.$$

Коэффициент чувствительности неопределенности воспроизводимых значений линейных ускорений к неопределенности задания числа оборотов ротора

$$c_n = \frac{\partial a}{\partial n} = 2Rn \left( \frac{\pi}{30} \right)^2.$$

Коэффициент чувствительности неопределенности воспроизводимых значений линейных ускорений к неопределенности измерения расстояния от оси ротора до точки в месте установки испытуемого узла

$$c_R = \frac{\partial a}{\partial R} = \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2.$$

Вклад неопределенности измерения частоты оборотов ротора по типу А в неопределенность воспроизводимых значений линейных ускорений

$$u_{nA}(a) = c_n u_A(\bar{n}).$$

Вклад неопределенности измерения числа оборотов ротора в минуту по типу В в неопределенность воспроизводимых значений линейных ускорений

$$u_{nB}(a) = c_n u_B(n).$$

Вклад неопределенности измерения расстояния от оси ротора до точки в месте установки испытуемого узла по типу В в неопределенность воспроизводимых значений линейных ускорений

$$u_{RB}(a) = c_R u_B(R).$$

Вклад неопределенности дискретности показаний частотомера по типу В в неопре-

деленность воспроизводимых значений линейных ускорений

$$u_{nBd}(a) = c_n u_{Bd}(n).$$

Вклад неопределенности цены деления измерителя радиального расстояния по типу В в неопределенность воспроизводимых значений линейных ускорений

$$u_{RBd}(a) = c_R u_{Bd}(R).$$

Суммарная стандартная неопределенность воспроизводимых значений линейных ускорений

$$u_c(a) = \sqrt{u_{nA}^2(a) + u_{nB}^2(a) + u_{RB}^2(a) + u_{nBd}^2(a) + u_{RBd}^2(a)}.$$

Расширенная относительная неопределенность воспроизводимых значений линейных ускорений центробежной машиной

$$U(a) = \frac{k \cdot u_c(a) \cdot 100\%}{x_j} \quad \text{при } P = 0,95.$$

Бюджет неопределенности при аттестации центробежных машин состоит из следующих параметров:

- значений входных величин;
- стандартной неопределенности по типу А;
- стандартных неопределенностей по типу В;
- коэффициентов чувствительности;
- вкладов составляющих в расширенную неопределенность;
- воспроизводимой величины;
- воспроизведенной величины;
- суммарной стандартной неопределенности;
- коэффициента охвата;
- расширенной неопределенности.

#### Бюджет неопределенности

Входная величина	Стандартная неопределенность по типу А	Стандартная неопределенность по типу В		Коэффициент чувствительности	Вклад составляющих в расширенную неопределенность			Воспроизводимая величина	Воспроизведенная величина	Суммарная стандартная неопределенность	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность
		$u_B(n)$	$u_{Bd}(n)$		$u_{nA}(a)$	$u_{nB}(a)$	$u_{nBd}(a)$					
$n$	$u_A(\bar{n})$	$u_B(n)$	$u_{Bd}(n)$	$c_n$	$u_{nA}(a)$	$u_{nB}(a)$	$u_{nBd}(a)$	$a$	$a'$	$u_c(a)$	$k$	$U(a)$
$R$	–	$u_B(R)$	$u_{Bd}(R)$	$c_R$	$u_{RB}(a)$		$u_{RBd}(a)$					

Бюджет неопределенности воспроизводимых центробежной машиной значений линейных ускорений приведен в таблице.

Результаты аттестации центробежной машины оформляются в виде таблицы, где приводятся значения расширенной относительной неопределенности для каждой исследованной точки диапазона воспроизводимых линейных ускорений с указанием коэффициента охвата

### **Вывод**

Разработанная методика расчета расширенной относительной неопределенности воспроизводимых центробежной машиной значений линейных ускорений позволяет оценивать интервал значений линейных ускорений, который с установленной доверительной вероятностью может быть обоснованно приписан каждому воспроизводимому при аттестации центробежной машины значению линейного ускорения.

### **Список использованной литературы**

1. ГОСТ 24555. Порядок аттестации испытательного оборудования. Основные положения. – Введ. 27.01.81. – М.: Госстандарт, 1982. – 12 с.
2. <https://www.twirpx.com/file/1791976>.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: ISO. – Geneva, 1993. – 101 p.
4. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»// Відом. Верховної Ради (ВВР). – 2014. – № 30. – Ст.1008.
5. Дуплишева О. М. и др. Экспериментальная обработка агрегатов автоматики и систем летательных аппаратов/ Под общ. ред. д. т. н. А. В. Дегтярева. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное» им. М. К. Янгеля», 2013. – 208 с.
6. Бондарь М. А. и др. Методология оценивания неопределенности измерений при проведении аттестации средств измерительной техники//Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч. - техн. ст. – 2017. – Вып. 1. – С. 3–7.

Статья поступила 21.06.2018