

Л. В. ЕФРЕМОВ

## ЗАПАС МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ИСПРАВНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Дается обоснование нового критерия оценки исправности приборов, названного запасом метрологической надежности. Предложенный метод можно положить в основу стандартов для поверки приборов и других средств измерений.

*Ключевые слова:* вероятность, запас метрологической надежности, исправность, квантиль, поверка, погрешность, средство измерения.

В Федеральном законе об обеспечении единства измерений [1, 2] особое значение придается проблеме подтверждения соответствия средств измерений (СИ) метрологическим требованиям путем выполнения первичных и периодических поверок. Это не простая проблема, поскольку погрешность — как основная метрологическая характеристика СИ — имеет вероятностную природу, которая по-разному учитывается поставщиками средств измерения при их поверках. Напомним, что при поверках погрешность каждого  $i$ -го измерения определяется как разность показания  $h_i$  прибора и истинного значения физической величины  $h_a$ , которая имитируется применяемым эталоном:

$$\Delta h_i = h_i - h_a. \quad (1)$$

К наиболее корректным методам следует отнести методы поверки, основанные на классическом правиле „трех сигм“, которое предусматривает выполнение многократных измерений погрешности в количестве  $M$  раз за сеанс поверки в целях сравнения предела допустимой погрешности  $\Delta h_a$  со средней квадратической погрешностью  $\sigma$  (СКП). Для исправного прибора СКП определяется по формуле

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^M (h_i - h_{\text{ср}})^2 / (M - 1)} = \sqrt{\sum_{i=1}^M (\Delta h_i)^2 / (M - 1)}, \quad (2)$$

где  $h_{\text{ср}}$  — среднее арифметическое значение показаний прибора, которое при поверках исправного прибора должно быть равно  $h_a$ .

Так, в методиках поверки современных средств измерения массы (весов) указывается, что значение  $\sigma$  определяется путем десятикратных измерений массы эталонной гири и не должно превышать  $1/3$  абсолютного значения предела погрешности весов. Анализ паспортных метрологических характеристик весов практически всех типов подтверждает это требование. При этом обращают на себя внимание весьма жесткие требования к условиям проведения самих поверок, которые направлены на предотвращение образования систематических ошибок. Такие требования отвечают интересам поставщиков СИ и, как правило, соблюдаются при выполнении первичных поверок. Однако в реальной жизни по мере изнашивания

механизма приборов могут накапливаться систематические погрешности, для выявления которых, собственно, и предназначены периодические поверки.

Для решения этой метрологической проблемы в работах [3, 4] впервые предложен, а в настоящей статье усовершенствован мощный критерий, который назван запасом метрологической надежности  $Z_h$ :

$$Z_h = \frac{|\Delta h_a| - |\Delta h_{\text{ср}}|}{\sigma_h}, \quad (3)$$

где  $\Delta h_{\text{ср}}$  — средняя арифметическая погрешность, которая в общем случае не равна нулю и определяется как

$$\Delta h_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^M \Delta h_i / M; \quad (4)$$

$\sigma_h$  — средняя квадратическая погрешность, определяемая по формуле

$$\sigma_h = \sqrt{\sum_{i=1}^M (\Delta h_{\text{ср}} - \Delta h_i)^2 / (M - 1)}. \quad (5)$$

В формуле (3) используются модули предела и средней погрешности для того, чтобы учесть их возможное зеркальное нахождение в отрицательной зоне поля разброса величин. Из этой формулы следует, что запас надежности  $Z_h$  есть не что иное, как квантиль нормального распределения, который характеризует вероятность недостижения предела погрешности  $P(\Delta h_a)$ . Это значит, что с его помощью можно объективно оценивать надежность СИ путем сравнения фактической вероятности с нормативным значением  $P_{\text{доп}}$  или, что равноценно, путем сравнения фактического запаса надежности  $Z_h$  с допустимым запасом  $Z_{\text{доп}}$ . При таком подходе правило „трех или шести сигм“ является частным случаем этого метода оценки исправности СИ. Числа „3“ и „6“ — это требуемые запасы надежности при соответствующих им вероятностях 0,9987 и 0,99999999. Такие высокие требования, как правило, относятся к первичным поверкам особо точных средств измерения, что достигается за счет их более высокой стоимости. Однако в зависимости от назначения приборов требования к  $Z_{\text{доп}}$  могут быть менее жесткими. Например, для бытовых или учебных приборов и инструментов запас надежности можно снизить до двух, и тогда  $P(\Delta h_a) = 0,977$ , или даже до единицы, и тогда  $P(\Delta h_a) = 0,841$ .

Опыт применения этого критерия выявил еще одно его важное свойство – возможность оценивать степень влияния систематических и случайных погрешностей на запас надежности, что следует из формулы (3) и иллюстрируется рис. 1, где представлены условные результаты стрельбы из ружья по мишени. Стремление при выполнении первичных поверок создавать условия, при которых случайная погрешность равна нулю, можно сравнить с точной стрельбой, производимой хорошим стрелком из хорошего ружья: см. рис. 1, а, где отмечена только небольшая СКП, а отклонений от десятки почти нет. В этом случае можно применять правило „трех сигм“. Появление в формуле (3) систематической ошибки в виде составляющей  $\Delta h_{\text{ср}}$  соответствует случаю, когда стрельба производится пусть даже хорошим стрелком, но из плохого ружья со сбитой мушкой (см. рис. 1, б). Систематическая погрешность  $\Delta h_{\text{ср}}$  может возникнуть по разным причинам, в том числе в результате износа механизма прибора. Выявление составляющей  $\Delta h_{\text{ср}}$  имеет важное практическое значение и при калибровке СИ после поверки. В общем же случае может быть обнаружена большая погрешность прибора под влиянием как случайных, так и систематических факторов (см. рис. 1, в).

На рис. 2 показан пример расчета распределения  $P(\Delta h)$  и плотности вероятности  $f(\Delta h)$  погрешности прибора по результатам его поверки до ремонта (кривые 1) и после ремонта (кривые 2), выполненного в целях устранения систематической погрешности. Известно, что  $\Delta h_a = 0,1$ . Как видно из рисунка, до ремонта при средней погрешности  $\Delta h_{\text{ср}1} = 0,15$  вероят-

ность  $P(\Delta h_a) = 0,266$ , а после устранения систематической погрешности при ремонте прибора получено:  $\Delta h_{cp2} = 0$  и  $P(\Delta h_a) = 0,894$ .

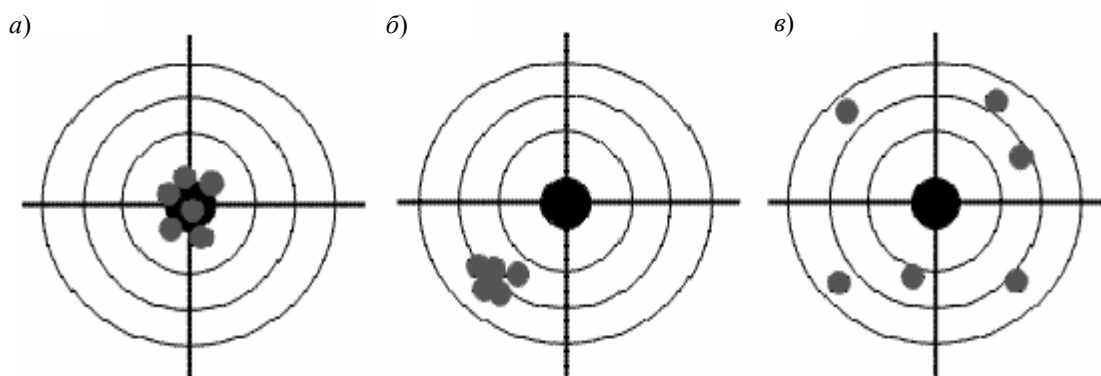


Рис. 1

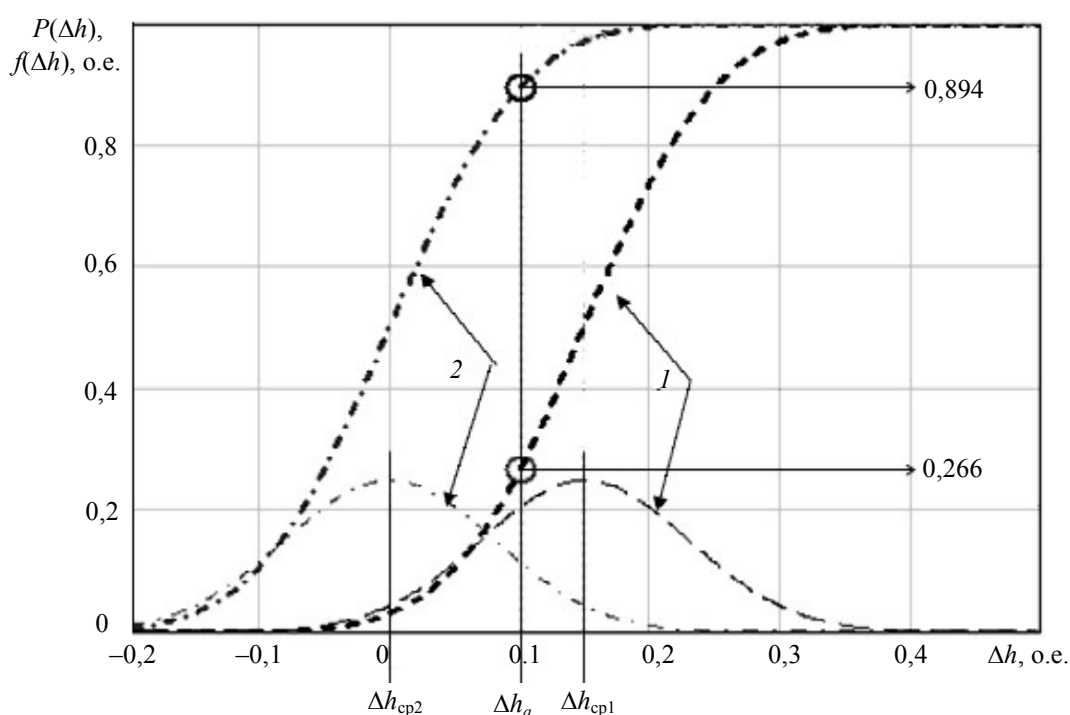


Рис. 2

Приведенная выше методика изложена применительно к использованию в качестве диагностического параметра абсолютной погрешности  $\Delta h_i$ , определяемой по формуле (1). Однако все зависимости и рассуждения полностью распространяются на исследования относительной погрешности прибора  $\overline{\Delta h}_i$  при подстановке этой величины в формулы (4) и (5) вместо абсолютной погрешности  $\Delta h_i$ :

$$\overline{\Delta h}_i = \Delta h_i / h_a = \frac{h_i}{h_a} - 1. \quad (6)$$

Данная методика оценки исправности приборов и других средств измерений имеет полное программное обеспечение и готова к широкому практическому применению.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон об обеспечении единства измерений. № 102-ФЗ. 26.06.08 [Электронный ресурс]: <<http://www.referent.ru/1/122400?1108>>.

2. РМГ 29-99. Метрология. Основные термины и определения [Электронный ресурс]: <[http://www.gametest.ru/doc/pov/rmg\\_29\\_99.pdf](http://www.gametest.ru/doc/pov/rmg_29_99.pdf)>.
3. *Ефремов Л. В.* Практика вероятностного анализа надежности техники с применением компьютерных технологий. СПб: Наука, 2008.
4. *Ефремов Л. В.* Моделирование трендов погрешности диагностических приборов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 2. С. 38—43.

**Сведения об авторе**

**Леонид Владимирович Ефремов** — д-р. техн. наук, профессор; Петербургский институт машиностроения, кафедра триботехники; E-mail: levlefr@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию  
29.03.10 г.