

Использование результатов калибровки координатно-измерительных машин FARO ARM для сравнительной оценки их точностных возможностей

Б. Н. МАРКОВ, А. Б. ШАРАМКОВ

Московский государственный технологический университет «Станкин»,
Москва, Россия, e-mail: bnmarkov@rambler.ru, iriadan@yandex.ru

Проанализированы результаты калибровки координатно-измерительных машин FARO ARM. Предложено использовать функцию доверия для сравнительной оценки метрологического качества отдельных экземпляров средств измерений. Установлено, что функция доверия определяется как произведение оперативных характеристик методов поверки (калибровки) и является функцией погрешностей методов и средств измерений, применяемых при калибровке.

Ключевые слова: калибровка, достоверность, функция доверия.

By the example of analysis of calibration results of FARO ARM coordinate measuring machines it is proposed to use a confidence function for metrological quality comparative estimation of separate measuring instruments. The confidence function is determined as a product of operating characteristics values of verification (calibration) methods and it is an error function of measuring methods and instruments used at calibration.

Key words: calibration, reliability, confidence function.

Достоверность поверки и калибровки средств измерений (СИ) оценивается с помощью групп показателей, определенных в методических указаниях [1, 2] и используемых при построении методик поверки. Эти указания позволяют оценивать вероятности ошибок 1-го и 2-го рода для совокупности поверяемых СИ, однако их невозможно применить к каждому конкретному экземпляру [3]. Между тем, проанализировав нормируемые метрологические характеристики по результатам поверки или калибровки, можно ввести некоторую интегральную характеристику для оценки общего уровня метрологического качества поверенного (откалиброванного) СИ. Такая характеристика определяет степень доверия к каждому СИ, и она тем больше, чем ближе к нулевым или номинальным значениям расположены результаты определения метрологических характеристик признанного годным СИ.

В качестве меры доверия можно ввести понятие функции доверия как произведение оперативных характеристик, определяющих вероятность соответствия данного СИ требуемым метрологическим характеристикам. В точках, соответствующих полученным результатам калибровки (или поверки), функция доверия становится функцией только погрешностей калибровки, и ее можно трактовать как обобщенную оперативную характеристику метода калибровки (поверки) в целом. Указанную выше вероятность соответствия можно считать степенью доверия к данному экземпляру СИ, сравнительным показателем его качества по отношению к другим экземплярам того же типа.

Аналогичные рассуждения применимы не только к СИ, но и к любым изделиям, подвергаемым измерительному контролю по своим показателям качества [4].

Рассмотрим определение функции доверия применительно к мобильным координатно-измерительным машинам (КИМ) компании FARO Technologies, Inc. (США).

Мобильные КИМ различных модификаций находят все большее распространение в отечественном машиностроении. Эти машины, имея большую погрешность, чем стационарные КИМ, имеют и некоторые достоинства: их легко может переместить один оператор; можно измерять размеры крупногабаритных объектов; не требуются знания программирования [5, 6]. Мобильные КИМ стоят значительно дешевле, чем стационарные измерительные машины. Одним из наиболее известных производителей на рынке мобильных КИМ является компания FARO.

Поставку, запуск в эксплуатацию, обучение, а также поддержку своих клиентов, использующих мобильные КИМ FARO ARM, осуществляет компания ТЕСИС (официальный представитель ведущих зарубежных производителей).

Компания FARO выпускает КИМ типа «рука» и проводит заводскую калибровку в соответствии со стандартом [7]. Калибровка проводится для определения максимального значения погрешности определения машиной расстояния между двумя точками во всем рабочем диапазоне или объеме [8—10]. В качестве эталонов используют прецизионные эталоны длины ball bar (scale bar) различных размеров, которые во время калибровки устанавливают в разных положениях и на различных расстояниях, определенных предусмотренной стандартом схемой. Все это контролируют погрешность в 20 позициях, отличающихся изучаемым квадрантом рабочего пространства машины, положением эталона (горизонтальное, вертикальное, под углом 45°) и его длиной. Максимальная погрешность определения длины в рабочем объеме должна находиться внутри интервала, допускаемого для этой машины.

Вместе с поставкой машины потребителю предоставляются таблицы с результатами калибровки по 20 позициям с указанием пределов допускаемой погрешности. При этом

возникают вопросы: в чем преимущества данного экземпляра, насколько значимы погрешности при использовании КИМ в поверенных позициях, даже если они не превышают допустимых значений. Например, для трех типоразмеров машин серии Faro Edge границы допускаемой погрешности измерений в рабочем объеме составляют $\pm 0,034$; $\pm 0,041$; $\pm 0,091$ мм.

Для построения методики оценки функции доверия к КИМ по погрешностям линейных измерений компания ТЕСИС предоставила данные о калибровке ряда машин различных моделей с разными рабочими зонами (диапазонами измерений). Исходя из данных калибровки одиннадцати КИМ FARO ARM (таблица), были составлены матрица DATA размером 20×11 , вектор L используемых при калибровке длин эталонов, вектор Δ_z значений пределов допускаемой погрешности (по каталогам производителя).

Характеристики исследованных экземпляров мобильных КИМ

Номер экземпляра КИМ	Модель машины	Предельный размер рабочей зоны, м	Предел допускаемой погрешности, мм
1	Platinum (7 осей)	2,4	0,043
2	То же	2,4	0,043
3	Platinum (6 осей)	2,4	0,036
4	Edge (7 осей))	2,7	0,041
5	То же	2,7	0,041
6	— » —	3,7	0,091
7	— » —	1,8	0,034
8	— » —	1,8	0,034
9	Fusion (7 осей)	3,7	0,147
10	То же	1,8	0,051
11	Platinum (7 осей)	3,0	0,073

Считаем, что погрешность калибровки Δ_k распределена нормально с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением, пропорциональным длине эталона L :

$$\Delta_k(\xi, \sigma_k) = \text{dnorm}(\xi, 0, \sigma_k), \quad \sigma_k = (a + bL)/2,$$

где $\text{dnorm}(\xi, 0, \sigma_k)$ — принятое в компьютерной математике обозначение для плотности нормального распределения случайной величины с нулевым математическим ожиданием и стандартным отклонением σ_k ; a, b — коэффициенты, определяющие пределы допускаемой погрешности эталонов на уровне двух стандартных отклонений.

Задание модели погрешности калибровки позволяет определить вероятность $W(\sigma_k, i, j)$ того, что погрешность машины с номером $j = 1, 2, \dots, 11$ по результатам DATA_{*i,j*} ее калиб-

ровки в позиции $i = 1, 2, \dots, 20$ по абсолютной величине не превышает пределов Δ_{zj} допускаемых значений:

$$W(\sigma_k, i, j) = \text{pnorm}[\Delta_{zj} - \text{DATA}_{i,j}, 0, \sigma_k] - \text{pnorm}[-\Delta_{zj} - \text{DATA}_{i,j}, 0, \sigma_k], \quad (1)$$

где $\text{pnorm}[\xi, \mu, \sigma_k]$ — значение интегральной функции нормального распределения в точке $\xi = \Delta_{zj} - \text{DATA}_{i,j}$ с математическим ожиданием $\mu = 0$ и стандартным отклонением σ_k .

В этом случае функцию доверия определяют как вероятность того, что действительная погрешность во всех позициях калибровки машины при измерении линейных размеров не выходит за пределы ее допускаемых значений.

Из данных рис. 1, построенного по результатам DATA-калибровок, следует, что погрешности в различных позициях калибровки КИМ настолько слабо коррелированы, что функцию доверия WW можно определить для каждой машины с номером j как произведение результатов, получаемых при помощи (1):

$$WW(\sigma_k, j) = \prod_{i=1}^{20} W(\sigma_k, i, j).$$

На рис. 2, а приведены графики функции доверия одиннадцати машин в зависимости от стандартного отклонения σ_k погрешности аттестации эталонов. Используя графики, можно визуально сравнить качество различных экземпляров КИМ или оценить для конкретного экземпляра максимально допустимое стандартное отклонение погрешности калибровки, обеспечивающее получение функции доверия на заданном уровне, например 0,95 или 95 %.

Результаты определения погрешностей линейных измерений КИМ в заданном диапазоне напрямую зависят от погрешности аттестации длины эталонов ball bar. Пределы допускаемой погрешности аттестации эталона нормируют двухчленной формулой

$$\Delta_k = \pm (a + bL).$$

В соответствии с данными, указанными в сертификате калибровки, предоставленном фирмой FARO для каждой КИМ, расширенная неопределенность на уровне 2σ аттестации прецизионного эталона длины равна $\pm (0,86 + 1,2L)$ мкм, где L — длина эталона в метрах. В связи с этим функции доверия для каждой машины различны, но крайне мало отличаются от единицы.

Графики, изображенные на рис. 2, а, позволяют оценить степень доверия к качеству каждой отдельной КИМ, однако их нельзя использовать для сравнения различных экземпляров, отличающихся нормированными значениями погрешности и рабочими зонами. Чтобы получить возможность для сравнения значений функции доверия между любыми отдельными КИМ, необходимо провести нормировку стандартного отклонения, используя граничные значения погрешности представленных экземпляров измерительных машин.

На рис. 2, б приведены зависимости значений функций доверия рассматриваемых КИМ от относительного

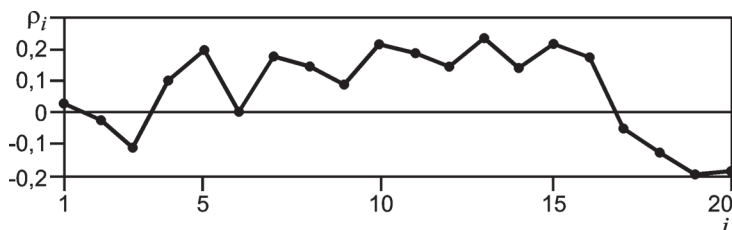


Рис. 1. Усредненные коэффициенты корреляции ρ_i между погрешностями КИМ в каждой i -й позиции ($i = 1, \dots, 20$) и погрешностями в остальных позициях калибровки по множеству исследуемых машин

стандартного отклонения σ , являющегося отношением стандартного отклонения σ_k погрешности калибровки к пределу допускаемых погрешностей данных машин. Сравнив графики, можно заключить, что наиболее надежными из перечисленных экземпляров являются те, которые на одном и том же уровне доверия, например 0,95, имеют большее, чем другие, значение σ .

Вывод. Таким образом можно утверждать, что из представленных контрольно-измерительных машин к наиболее надежным относятся экземпляры №№ 1, 4, 8, 10 и 11. Погрешности измерений этих машин при одинаковых условиях эксплуатации будут дольше оставаться в указанных для них пределах.

Функция доверия позволяет количественно оценить уровень метрологического качества отдельного экземпляра средства измерений.

Работа проведена при поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с заданием № 9.2545.2014/К на выполнение НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

Литература

1. **МИ 187—86.** Достоверность и требования к методикам поверки средств измерений.
2. **МИ 188—86. ГСИ.** Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки.
3. **Марков Б. Н., Меликова О. Н.** Численные методы определения характеристик достоверности методов поверки // Электротехнические комплексы и системы управления. 2012. № 3. С. 34—39.
4. **Меликова О. Н.** Достоверность допускового контроля изделий машиностроения // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 4. С. 34—38.
5. **Телешевский В. И.** Измерительная информатика в машиностроении // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 1. С. 33—38.
6. **Телешевский В. И.** Измерительная информатика в машиностроении // Вестник МГТУ «Станкин». 2008. № 2. С. 41—45.
7. **ASME B89.4.22—2004.** Methods for performance evaluation of articulated arm coordinate measuring machines.
8. **Grigoriev S. N., Teleshevsky V. I., Sokolov V. A.** Volumetric Geometric Accuracy Improvement for Multi-Axis Systems Based on Laser Software Error Correction // Proc. Int. Conf. Competitive Manufacturing (COMA—13). Stellenbosch, South Africa, 2013. P. 301—306.
9. **Григорьев С. Н. и др.** Проблемы метрологического обеспечения подготовки производства в машиностроении // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 27—29; **Grigoriev S. N. e. a.** The problems of metrological support for the preparation of production in machine construction // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 5. P. 526—529.

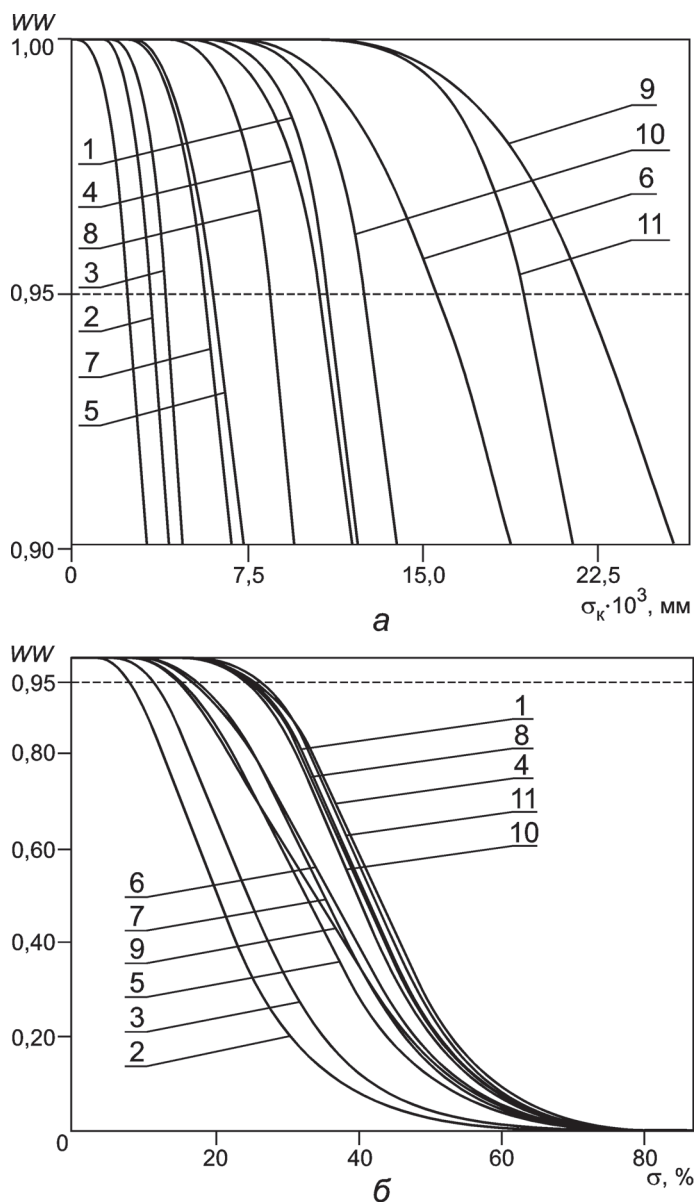


Рис. 2. Функция доверия WW для одиннадцати исследованных машин в зависимости от стандартного отклонения σ_k (а) и от относительного стандартного отклонения σ (б) погрешности калибровки

10. **Григорьев С. Н. и др.** Современное состояние и перспективы развития метрологического обеспечения машиностроительного производства // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 56—59; **Grigoriev S. N. e. a.** Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 11. P. 1311—1315.

Дата принятия 04.06.2014 г.