

# Прикладні аспекти: геометричні вимірювання

УДК 531.77

О.А. Новоселов

Публичное акционерное общество «АрселорМиттал Кривой Рог», Кривой Рог

## ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КАЛИБРОВКЕ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИН ТИПА ИЗМ

*В статье рассмотрен вопрос оценки неопределенности измерений при калибровке оптико-механических измерительных машин, используемых в качестве вспомогательных средств измерительной техники, для калибровочных работ в соответствии с требованиями стандарта ДСТУ ISO/IEC 17025.*

**Ключевые слова:** калибровка средств измерительной техники, измерительная машина, методика калибровки, калибровочная лаборатория, неопределенность измерений.

### Введение

**Постановка проблемы.** Оценка неопределенности измерений при калибровке средств измерительной техники (СИТ), аккредитованными Национальным агентством по аккредитации Украины калибровочными лабораториями, является актуальной задачей. Это связано с тем, что одним из основных разделов методики калибровки СИТ есть раздел оценивания неопределенности измерений.

Отсутствие основополагающих (стандартизованных) методик калибровки СИТ, определяющих оценивание неопределенности измерений, составление уравнения измерений при калибровке, бюджета неопределенности измерений может привести к нарушению единства измерений.

Согласно стандарту ДСТУ ISO/IEC 17025 [1] аккредитованные калибровочные лаборатории обязаны откалибровать перед вводом в эксплуатацию все СИТ, используемые для калибровочных работ, включая СИТ для вспомогательных измерений, имеющих значительное влияние на точность и достоверность результатов калибровки.

Оптико-механические измерительные машины типа ИЗМ предназначены для измерений наружных и внутренних линейных размеров мер и изделий непосредственно по линейным шкалам (абсолютным методом) или путем сличения с эталонными мерами (относительным методом).

В калибровочной практике измерительные машины применяются как вспомогательное оборудование при калибровке плоскопараллельных концевых мер длины (ПМКД), нутромеров микрометрических, установочных мер микрометров.

В настоящее время измерительные машины калибровочных лабораторий калибруют национальные метрологические институты (НМИ) Украины – национальный научный центр «Институт метрологии» и государственное предприятие «Укрметртестстандарт» по месту их эксплуатации.

В сертификатах (свидетельствах) калибровки, выдаваемых НМИ, в качестве метода калибровки указывается нормативный документ, регламентирующий методы и средства поверки машин оптико-механических типа ИЗМ для измерения длин – ДСТУ ГОСТ 8.336:2008 [2], так как национальные стандарты, имеющие достаточную информацию о том, как проводить калибровку измерительных машин отсутствуют.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Проблеме создания основополагающих (стандартизованных) методик калибровки СИТ посвящено достаточное количество публикаций в метрологических изданиях Украины, потому что, калибровка СИТ прямо связана с доверием к результатам измерений при проведении испытаний продукции аккредитованными на соответствие требованиям стандарту [1] испытательными лабораториями.

В частности, в статье [3] сделан вывод, что «проведение калибровки СИТ с указанием неопределенности измерений требует серьезной научно-технической подготовки, которая должна включать разработку процедур калибровки для конкретных групп СИТ».

**Формулирование цели статьи.** Цель данной статьи – определить и оценить источники неопределенности измерений при калибровке оптико-механических измерительных машин типа ИЗМ-10.

## Изложение основного материала

Основой для разработки процедуры оценивания неопределенности измерений может служить руководство ЕА – 4/02 [4], регламентирующее порядок оценки неопределенности измерений при калибровке СИТ и предназначенное специально для калибровочных лабораторий.

При проведении калибровки измерительных машин применяются следующие эталонные СИТ: ПКМД 3-го и 4-го разрядов по ДСТУ ГОСТ 9038 [5] для миллиметровой и дециметровой шкал соответственно.

В процессе калибровки осуществляется определение разности между результатом измерения длины эталонной ПКМД с помощью калибруемой измерительной машины и номинальным значением длины эталонной ПКМД.

Метод измерения основан на прямом многократном измерении срединной длины эталонной ПКМД с помощью измерительной машины.

Модельное уравнение в этом случае имеет вид:

$$\Delta = (L_C + \Delta_C) - (L_S + \Delta_S), \quad (1)$$

где  $\Delta$  – систематическая погрешность измерительной машины в калибруемой точке;  $L_C$  – значение длины ПКМД, измеренное калибруемой измерительной машиной;  $\Delta_C$  – поправки на неисключенную систематическую погрешность (НСП) измерительной машины;  $L_S$  – номинальное значение эталонной ПКМД;  $\Delta_S$  – поправки на дополнительные НСП эталонной ПКМД, которые связаны с отклонением температуры от нормальной (20° С).

Источниками неопределенности измерений при калибровке измерительной машины являются: наблюдаемое рассеивание показаний измерительной машины (обуславливающие стандартные неопределенности типа А) и поправки на НСП измерительной машины и эталонной ПКМД (обуславливающие стандартные неопределенности типа В).

Составляющая неопределенности измерения типа А оценивается как стандартная неопределенность  $u_A$ , равная среднеквадратическим отклонениям средних арифметических многократных (не менее 10) измерений срединной длины эталонной ПКМД и находится для каждого диапазона измерений измерительной машины по формуле:

$$u_A = h \sqrt{\frac{1}{n_i(n_i - 1)} \sum_{j=1}^{n_i} (L_j - \bar{L}_i)^2}, \quad (2)$$

где  $h$  – коэффициент надежности, вводимый при малом числе измерений (при  $n = 10$ ,  $h = 1,0$ ).

Составляющие стандартной неопределенности типа В ( $u_B$ ) оцениваются как стандартные отклонения, получаемые из известных границ, в которых могут находиться значения измеряемых величин.

Стандартная неопределенность измерения  $u_B$  получается при этом с помощью метрологически

обоснованной оценки изменчивости входной величины, учитывая всю имеющуюся в распоряжении информацию.

К этой категории принадлежат следующие значения: данные производителя; значения из других, ранее проведенных измерений; значения, полученные в результате опыта или общих знаний о свойствах применяемых материалах или СИТ; значения, содержащиеся в свидетельствах о калибровках; неопределенности измерения, связанные со справочными значениями из справочной литературы.

В качестве справочной литературы в данной работе использована книга [6], в которой изложены методы поверки, юстировки и ремонта измерительных машин.

Поправки на НСП измерительной машины будут складываться из следующих составляющих: погрешности компарирования; погрешности выполнения миллиметровой и дециметровой шкал; погрешности от недостаточно точной юстировки; погрешности отсчетного устройства (оптиметра); погрешности, зависящие от неточного отсчета.

Поправки на НСП, связанные с отклонением температуры от нормальной (20 °С) будут состоять из: погрешности от разности температур шкал и эталонной ПКМД; погрешности от разности их коэффициентов линейного расширения.

Оценим составляющие суммарной стандартной неопределенности по типу В в калибруемой точке диапазона измерений 0,001 мм - 1000 мм – 1000 мм.

**1. Неопределенность погрешности компарирования.** Ось измерения располагается на измерительных машинах параллельно, но выше плоскости, в которой расположены отсчетные шкалы машины, что противоречит компараторному принципу Аббе. Но возможные вследствие этого погрешности компенсируются применяемой на машинах оптической схемой, при которой погрешности, возникающие от наклона бабок при их движении вследствие непрямолинейности направляющих станины, незначительны. Погрешность от наклона бабок определяется по формуле:

$$\delta_1 = 0,5 \cdot L \cdot \varphi^2, \quad (3)$$

где  $L$  – измеряемая длина в мм;

$\varphi$  – угол наклона измерительной оси в минутах.

По нормам точности на изготовление измерительных машин допустимое отклонение от прямолинейности направляющих станины составляет 0,08 мм на длину в 1000 мм, что в угловой мере равно 16" (в радианах 0,00008). Исходя из этого при длине измерений равной 1000 мм,  $\delta_1 = \pm 32 \cdot 10^{-7} L$ .

Неопределенность погрешности компарирования, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_1) = 32 \cdot 10^{-7} L / \sqrt{3} = 0,002 \text{ мкм}. \quad (4)$$

**2. Неопределенность погрешности миллиметровой шкалы.**

К применению допускаются шкалы, у которых отклонения от номинального расстояния между любыми двумя штрихами не превышают  $\pm 0,5$  мкм.

Определение поправок при аттестации шкал производится с погрешностью до  $0,3$  мкм.

Следовательно, погрешность измерения, при использовании миллиметровой шкалы, может достигать величины  $\delta_2 = \pm 0,6$  мкм.

Неопределенность погрешности миллиметровой шкалы, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_2) = \frac{0,6}{\sqrt{3}} = 0,35 \text{ мкм.} \quad (5)$$

**3. Неопределенность погрешности дециметровой шкалы.** Использование дециметровой шкалы при измерениях абсолютным методом обычно производится с учетом поправок, полученных в результате аттестации этой шкалы. Погрешность аттестации будет равна:

$$\delta_3 = \pm (0,2 + 3,5 \cdot 10^{-3} L) \text{ мкм,} \quad (6)$$

где  $L$  – длина интервала метровой шкалы в мм.

Неопределенность погрешности дециметровой шкалы, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_3) = \frac{3,7}{\sqrt{3}} = 2,14 \text{ мкм.} \quad (7)$$

**4. Неопределенность погрешности показаний оптиметра.** Допускаемая погрешность на оптиметры составляет  $\delta_4 = \pm 0,3$  мкм.

Неопределенность погрешности показаний оптиметра, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_4) = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,17 \text{ мкм.} \quad (8)$$

**5. Неопределенность погрешности неточной юстировки машины.** Так как допустимое смещение двойного штриха относительно центра поля зрения равно  $\pm 0,3$  мм, то погрешность не должна превышать  $\delta_5 = \pm 0,3$  мкм.

Неопределенность погрешности неточной юстировки машины, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_5) = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,17 \text{ мкм.} \quad (9)$$

**6. Неопределенность погрешности неточного отсчета.** Ошибка при неблагоприятных условиях, связанная с неточностью совмещения штрихов, составляет одну шестидесятую расстояния между осями двойных штрихов (биссекторов).

При расстоянии между осями этих штрихов равном  $0,012$  мм погрешность совмещения будет  $\pm 0,2$  мкм. Так как наводку производят дважды (при

установке машины на нуль и отсчете при измерении меры), погрешность удваивается и будет равна  $\delta_6 = \pm 0,3$  мкм.

Неопределенность погрешности неточного отсчета, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_6) = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,17 \text{ мкм.} \quad (10)$$

**7. Неопределенность температурных погрешностей.** В результате различия масс машины и измеряемой ПКМД имеет место большая тепловая инерция, которая препятствует полному выравниванию температур машины и ПКМД. Практическая разность температур измеряемой ПКМД и машины колеблется в пределах от  $0,3^\circ \text{C}$  до  $1^\circ \text{C}$ . Для измеряемых длин свыше  $100$  мм допустимые колебания должны находиться в пределах  $0,3^\circ \text{C}$ .

Учитывая коэффициент линейного расширения при нагревании на  $1^\circ \text{C}$  равный  $11,5 \cdot 10^{-6}$ , погрешность от разности температур машины и измеряемого объекта определяется для длин свыше  $100$  мм:

$$\delta_7 = \pm 0,3 \cdot 11,5 \cdot 10^{-6} \cdot (L_1 + L_2) \text{ мкм,} \quad (11)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  – длина измерения по миллиметровой и дециметровой шкалах соответственно, в мм.

Неопределенность температурных погрешностей, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_7) = \frac{3,45}{\sqrt{3}} = 1,99 \text{ мкм.} \quad (12)$$

Другой температурной погрешностью измерения является разность коэффициентов линейного расширения металлов, из которых выполнены измерительная машина и концевые меры длины. Коэффициент линейного расширения стеклянной миллиметровой шкалы равен  $10,2 \cdot 10^{-6}$ . Так как дециметровая шкала представляет собой стальную линейку с смонтированными в ней стеклянными пластинами, коэффициенты линейного расширения ее и эталонной ПКМД будут несколько различаться.

Принимая разность коэффициентов линейного расширения дециметровой шкалы и эталонной ПКМД длины равной  $0,5 \cdot 10^{-6}$ , погрешность показаний будет для длин свыше  $100$  мм:

$$\delta_8 = \pm (1,3 \cdot 10^{-6} L_1 + 0,5 \cdot 10^{-6} L_2) \text{ мкм,} \quad (13)$$

Неопределенность температурных погрешностей, связанная с разностью коэффициентов линейного расширения, в предположении равномерного закона распределения, будет равна:

$$u_B(\delta_8) = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 0,0003 \text{ мкм.} \quad (14)$$

8) Значение стандартной неопределенности эталонной ПКМД определяется из выражения:

$$u_B(L_S) = \frac{U(L_S)}{k}, \quad (15)$$

где  $U(L_S) = (20 + 0,2L)$ , нм – значение расширенной неопределенности калибровки эталонной ПКМД, указанная в сертификате (свидетельстве) калибровки;  $k = 2$  – коэффициент охвата для вероятности 0,95.

Для  $L = 1000$  мм,  $u_B(L_S) = 0,11$  мкм.

Суммарная стандартная неопределенность по типу В составит:

$$u_B = \sqrt{\sum_i u_B^2(\delta_i) + u_B^2(L_S)} = 2,96 \text{ мкм.} \quad (16)$$

Суммарная стандартная неопределенность измерения будет определяться через стандартные неопределенности входных величин по формуле:

$$u_C(\Delta) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (17)$$

Если предположить, что  $u_A = 0$ , то суммарная стандартная неопределенность  $u_C(\Delta) = u_B$ .

Расширенная неопределенность измерения при калибровке измерительной машины будет определяться из выражения:

$$U(\Delta) = k \cdot u_C(\Delta), \quad (18)$$

$k = 2$  – коэффициент охвата для вероятности 0,95.

Расширенная неопределенность, вычисленная по формуле (18), составит:  $U(\Delta) = 5,92$  мкм.

Бюджет неопределенности измерений при калибровке измерительной машины в калибруемой точке 1000 мм приведен в табл. 1.

Ни одна из входных величин не рассматривается коррелированной с другими величинами в какой-нибудь значительной степени. Все коэффициенты чувствительности при прямых измерениях длины геометрических объектов равны 1.

Таблица 1

Бюджет неопределенности измерений при калибровке измерительной машины

Входная величина	Оценка входной величины, мкм	Стандартная неопределенность, мкм	Коэффициент чувствительности	Вклад неопределенности, мкм
$L_C$	$\bar{L}_C$	0,11	–	0,11
$\delta_1$	0,0032	0,002	1	0,002
$\delta_2$	0,6	0,35	1	0,35
$\delta_3$	3,7	2,14	1	2,14
$\delta_4$	0,3	0,17	1	0,17
$\delta_5$	0,3	0,17	1	0,17
$\delta_6$	0,3	0,17	1	0,17
$\delta_7$	3,45	1,99	1	1,99
$\delta_8$	0,0005	0,0003	1	0,0003
Выходная величина	Оценка выходной величины, мкм	Суммарная стандартная неопределенность, мкм	Коэффициент охвата	Расширенная неопределенность, мкм
$\Delta$	(1)	2,96	2	5,92

## Выводы

1 Рассмотрена процедура оценивания неопределенности измерений при калибровке оптико-механических измерительных машин типа ИЗМ, определены и оценены источники неопределенности, составлен бюджет неопределенности.

2 Основопологающие (стандартизованные) методики калибровки конкретных типов СИТ – залог обеспечения единства измерений в Украине.

## Список литературы

1. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності виробувальних та калібрувальних лабораторій.

2. ДСТУ ГОСТ 8.336:2008 Машины оптико-механи-

ческие типа ИЗМ для измерения длин. Методы и средства поверки.

3. Малецкая О.Е., Москаленко М.В. Калибровка СИТ: оценка погрешности и неопределенности измерений / О.Е. Малецкая, М.В. Москаленко // Системы обработки информации. – 2013. – выпуск 3 (110). – С. 75-79.

4. EA - 4/02. Expression of the uncertainty of measurement in calibration. (Выражение неопределенности измерений при калибровках).

5. ДСТУ ГОСТ 9038:2009 Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия.

6. Эрвайс А. В. Юстировка и ремонт измерительных машин. — М.: Машигиз, 1960. — 108 с.

Поступила в редколлегию 28.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ОПТИКО-МЕХАНІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ МАШИН

О.А. Новосьолов

У статті розглянуто питання оцінки невизначеності вимірювань при калібруванні оптико-механічних вимірювальних машин, що використовуються в якості допоміжних засобів вимірювальної техніки, для калібрувальних робіт відповідно до вимог стандарту ДСТУ ISO / IEC 17025.

**Ключові слова:** калібрування засобів вимірювальної техніки, вимірювальна машина, методика калібрування, калібрувальна лабораторія, невизначеність вимірювань.

**EVALUATION OF UNCERTAINTY IN THE CALIBRATION OF OPTICAL-MECHANICAL MEASURING MACHINES**

O.A. Novoselov

*In the article the question of uncertainty of measurements for calibration of optical-mechanical measuring machines used as auxiliary measurement equipment for calibration activities in accordance with the requirements of DSTU ISO / IEC 17025.*

**Keywords:** *calibration of measuring instruments, measuring machine, calibration method, calibration laboratory, measurement uncertainty.*