

УДК 53.089.6

М. А. Волошина, А. С. Головин, Л. А. Ерес, И. М. Курако

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Действующие документы в сфере метрологического обеспечения предписывают при калибровке средств измерительной техники оценивать неопределенность измерений. В Украине отсутствует регламентированная методика расчета неопределенности при калибровке средств измерительной техники, что обуславливает необходимость разработки такой методики. В данной статье предлагается методика расчета неопределенности измерений при калибровке средств измерительной техники, согласно которой при расчете должно проводиться вычисление:

а) стандартной неопределенности по типу А для исправленных результатов наблюдений, полученных при проведении калибровки;

б) стандартных неопределенностей по типу В, обусловленных погрешностью или неопределенностью используемого рабочего эталона, дискретностью отсчета или ценой деления шкалы калибруемого средства измерительной техники, вариацией показаний калибруемого средства измерительной техники;

в) суммарной стандартной неопределенности измерений;

г) расширенной неопределенности измерений.

В качестве примера приведены результаты расчета расширенной неопределенности измерений при проведении калибровки:

– виброметра 795М107В в комплекте с акселерометром АС102–1А;

– измерительного канала переменного напряжения измерительно-вычислительного комплекса типа МІС;

– манометра типа МТ.

Результаты расчета неопределенности измерений представлены в виде таблиц бюджета неопределенности измерений, которые совместно с полученными при проведении калибровки результатами наблюдений должны заноситься в сертификат калибровки средства измерительной техники. Предлагаемая методика расчета неопределенности применима для данных типов средств измерительной техники, калибровки которых проводятся методом прямых измерений воспроизводимых или контролируемых рабочими эталонами известных значений измеряемых величин.

**Ключевые слова:** расширенная неопределенность, многократные измерения, бюджет неопределенности измерений, виброметр, манометр типа МТ, измерительно-вычислительный комплекс типа МІС.

Чинні документи у сфері метрологічного забезпечення приписують під час калібрування засобів вимірювальної техніки оцінювати невизначеність вимірювань. В Україні немає регламентованої методики розрахунку невизначеності під час калібрування засобів вимірювальної техніки, що обумовлює необхідність розроблення такої методики. У цій статті запропоновано методику розрахунку невизначеності вимірювань під час калібрування засобів вимірювальної техніки, згідно з якою під час розрахунку повинні обчислювати:

а) стандартну невизначеність за типом А для виправлених результатів спостережень, отриманих під час проведення калібрування;

б) стандартні невизначеності за типом В, обумовлені похибкою або невизначеністю використовуваного робочого еталона, дискретністю відліку або ціною поділки шкали каліброваного засобу вимірювальної техніки;

в) сумарну стандартну невизначеність вимірювань;

г) розширену невизначеність вимірювань.

Як приклад наведено результати розрахунку розширеної невизначеності вимірювань під час калібрування:

– виброметра 795М107В у комплекті з акселерометром АС102–1А;

– вимірювального каналу змінної напруги вимірювально-обчислювального комплексу типу МІС;

– манометра типу МТ.

Результати розрахунку невизначеності вимірювань подано у вигляді таблиць бюджету невизначеності вимірювань, які спільно з отриманими під час калібрування результатами спостережень повинні заносити в сертифікат калібрування засобу вимірювальної техніки. Запропонована методика розрахунку невизначеності застосовна для цих типів засобів вимірювальної техніки, калібрування

яких проводять методом прямих вимірювань відтворюваних або контрольованих робочими еталонами відомих значень вимірюваних величин.

**Ключові слова:** розширена невизначеність, багаторазові вимірювання, бюджет невизначеності вимірювань, віброметр, манометр типу МТ, вимірювально-обчислювальний комплекс типу МІС.

*The effective documents in the field of metrological support require evaluating measurement uncertainty during measuring instrumentation calibration. In Ukraine, there is no regulated procedure of uncertainty calculation during measuring instrumentation calibration, which causes the necessity of developing such procedure. This article proposes the measurement uncertainty calculation procedure during measuring instrumentation calibration, according to which the following calculations shall be made:*

- a) of standard uncertainty of A type for corrected observation results obtained during calibration;
- b) of standard uncertainties of B type caused by error or uncertainty of working standard applied, calculation discreteness or calibrated measuring instrument division value, variation of calibrated measuring instrument indications;
- c) of total standard measurement uncertainty;
- d) of augmented measurement uncertainty.

*As an example, the results of calculation of augmented measurement uncertainty during calibration are presented:*

- for 795M107B vibrometer in complete set with AC102-1A accelerometer;
- for alternating voltage measurement channel of a measuring and computing complex of MIC type;
- for a manometer of MT type.

*The obtained results of measurement uncertainty calculation are presented in the form of tables of measurement uncertainty budget, which shall be entered in the measuring instrument calibration certificate together with the observation results obtained during calibration. The proposed uncertainty calculation procedure is applicable for the given types of measuring instruments whose calibration is performed by method of direct measurement of known measurement values represented or controlled by working standards.*

**Keywords:** augmented measurement uncertainty, multiple measurements, measurement uncertainty budget, vibrometer, manometer of MT type, computing complex of MIC type.

Калибровка – совокупность операций, с помощью которых при заданных условиях на первом этапе устанавливается соотношение между значениями величины, которые обеспечиваются эталонами с присущими им неопределенностями измерений, и соответствующими показаниями со связанными с ними неопределенностями измерений, а на втором этапе эта информация используется с целью установления соотношения для получения результата измерения исходя из показания [1]. Калибровке в добровольном порядке подлежат средства измерительной техники, которые используются как в сфере законодательно регулируемой метрологии, так и вне ее. Согласно п. 5.4.6.1 [2] при калибровке необходимо проводить оценивание неопределенности измерения.

Неопределенность измерений – это характеристика неточности измерений, принятая на международном уровне. Понятие «неопределенность» отражает отсутствие знания об истинном значении измеряемой величины  $Y$  и выражает сомнение в том,

насколько точно измеренное значение  $Y$  представляет  $Y$ . В соответствии с [3] неопределенность – это параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий разброс значений, которые можно обоснованно приписать измеряемой величине. Понятие «неопределенность измерений» используется наряду с понятием «погрешность измерений». Однако для корректного анализа точности полученного результата измерений используется оценка неопределенности измерений.

Оценка характеристик погрешности измерений проводится согласно действующей в Украине нормативной документации.

В настоящее время в Украине отсутствует национальная нормативная база, в которой была бы определена методология оценивания неопределенности измерений для конкретных типов или групп средств измерительной техники.

Базовый общий алгоритм оценивания неопределенности при калибровке приведен в документе Европейской ассоциации по аккредитации [4]. Однако при оценива-

нии неопределенности по [4] необходимо также учитывать специфические особенности методов измерений, применяемых во время калибровки конкретных типов или групп средств измерительной техники.

Специалистами ГП «КБ «Южное» проводится разработка методик расчета неопределенности измерений при калибровке различных типов средств измерительной техники. В данной статье представлены методики расчета расширенной неопределенности при калибровке методом непосредственных измерений (как наиболее распространенного) трех типов средств измерительной техники, два из которых используются в качестве рабочих эталонов, а одно – в качестве рабочего средства измерительной техники.

Экспериментальные исследования при калибровке средств измерительной техники требуют многократных измерений в нескольких точках диапазона измерений. Для расчета стандартной неопределенности по типу А принято проведение не менее пяти измерений в каждой калибруемой точке.

При оценивании расширенной неопределенности во время калибровки средств измерительной техники следует придерживаться следующей последовательности действий:

1. Проведение измерений и получение результатов наблюдений.

2. Формирование исходных данных для оценки неопределенности. Исходными данными являются:

- результаты многократных измерений;
- сведения о законе распределения результатов многократных измерений;
- данные, основанные на опыте калибровки или общих знаниях о поведении и свойствах соответствующих средств измерительной техники;
- неопределенности используемых констант и справочных данных;
- данные о результатах калибровки эталонного средства измерительной техники и т. п.

3. Составление записи модельного уравнения, связывающего между собой входные величины измерительного процесса с измеряемой (входной) величиной. При этом в

дальнейшем по неопределенностям, связанным с входными величинами, проводится вычисление неопределенности измеряемой величины.

4. Внесение поправок на систематические эффекты, которые можно исключить. Процедура внесения поправок отражена в [5].

5. Вычисление стандартных неопределенностей по типам А и В.

Стандартная неопределенность по типу А  $u_A$ , обусловленная разбросом показаний калибруемого средства измерительной техники при выполнении многократных измерений, рассчитывается согласно [4].

Стандартная неопределенность по типу В эталонного средства измерительной техники  $u_{Bst}$  вычисляется по формуле

$$u_{Bst} = \frac{U_{st}}{k},$$

где  $U_{st}$  – расширенная неопределенность эталонного средства измерительной техники (указана в сертификате его калибровки);  $k$  – коэффициент охвата при доверительной вероятности  $P=0,95$  (указан в сертификате калибровки).

Стандартная неопределенность по типу В, обусловленная дискретностью отсчета показаний (либо ценой деления) калибруемого средства измерительной техники  $u_{Bd}$ , в предположении о равномерном законе распределения вычисляется по формуле

$$u_{Bd} = \frac{d}{2\sqrt{3}},$$

где  $d$  – цена деления (для стрелочных средств измерительной техники) либо дискретность отсчета (для цифровых средств измерительной техники).

Стандартная неопределенность по типу В, обусловленная вариацией результатов наблюдений для калибруемого средства измерительной техники  $u_{BH}$ , в предположении о равномерном законе ее распределения от 0 до  $H$  вычисляется по формуле

$$u_{BH} = \frac{H}{2\sqrt{3}},$$

где  $H$  – вариация результатов наблюдений.

6. Вычисляется суммарная стандартная неопределенность по формуле

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_{Bst}^2 + u_{Bd}^2 + u_{BH}^2}.$$

7. Вычисляется расширенная неопределенность измерений  $U$  при проведении калибровки средства измерительной техники по формуле

$$U = u_c \cdot k,$$

где  $k$  – коэффициент охвата, который при доверительной вероятности  $P=0,95$  равен 2.

8. Составление бюджета неопределенности измерений при проведении калибровки. Бюджет неопределенности состоит из следующих параметров:

- значения входной величины;
- стандартной неопределенности по типу А;
- стандартных неопределенностей по типу В;
- суммарной стандартной неопределенности;
- коэффициента охвата;
- расширенной неопределенности.

9. Представление результата измерений. Полный результат измерения включает в себя оценку входной величины и приписанное ей значение расширенной неопределенности с указанием доверительной вероятности:

$$Y = y \pm U, P = 0,95.$$

10. Оформление результатов калибровки. По результатам работ оформляется сертификат калибровки (в соответствии с СОOMET R/GM/15:2007. Порядок оформления сертификатов калибровки, выдаваемых национальными метрологическими институтами в рамках SIMP MRA).

Для иллюстрации предлагаемой методики рассмотрим средства измерительной техники, подлежащие калибровке:

- виброметр 795M107В в комплекте с акселерометром АС102–1А;
- измерительный канал переменного напряжения измерительно-вычислительного комплекса типа МИС;
- манометр типа МТ.

Структурные схемы калибровки указанных средств измерительной техники приведены на рис. 1 – 3 соответственно.



Рис. 1. Структурная схема калибровки виброметра в комплекте с акселерометром:  
ПК – персональный компьютер;  
СПО – специальное программное обеспечение

Калибровка виброметра в комплекте с акселерометром (рис. 1) происходит следующим образом. На стол вибрационной установки устанавливают подсоединенный к виброметру 795M107В акселерометр АС102–1А. Воспроизводятся с помощью вибрационной установки заданные значения амплитуды виброускорений и частоты колебаний. Измерительным каналом регистрируется амплитуда виброускорений и частота колебаний.

Бюджет неопределенности измерений при калибровке виброметра 795M107В в комплекте с акселерометром АС102–1А приведен в табл. 1.

Одной из метрологических характеристик измерительного канала переменного тока измерительно-вычислительного комплекса типа МИС является нелинейность амплитудно-частотной характеристики. Калибровка измерительного канала (рис. 2) по этой характеристике происходит следующим образом. С помощью генератора и вольтметра подаются на измерительный канал на требуемой частоте значения напряжения переменного тока, равномерно распределенные по диапазону измерений измерительно-вычислительного комплекса типа МИС. Проводится регистрация каждого значения напряжения переменного тока.



Рис. 2. Структурная схема калибровки измерительно-вычислительного комплекса типа МІС

Бюджет неопределенности измерений при калибровке измерительно-вычислительного комплекса типа МІС для значения напряжения 3,5 В приведен в табл. 2.

По такому же принципу рассчитывается расширенная неопределенность при определении неравномерности амплитудно-частотной характеристики.

Калибровка манометра типа МТ (рис. 3) происходит следующим образом. На грузопоршневой манометр устанавливается манометр типа МТ. С помощью грузопоршневого манометра подается требуемое значение давления на манометр типа МТ. Проводится регистрация показаний по прямому

и обратному ходу для каждого задаваемого значения давления.

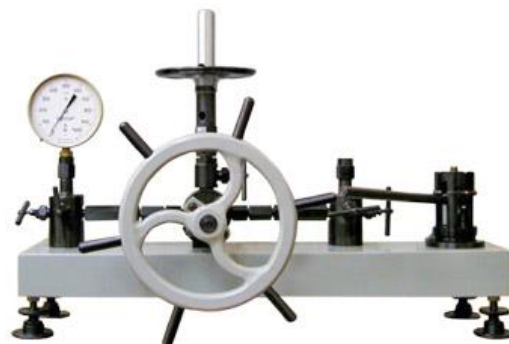


Рис. 3. Структурная схема калибровки манометра типа МТ

Бюджет неопределенности измерений при калибровке манометра типа МТ для давления 10 кгс/см<sup>2</sup> приведен в табл. 3.

Результаты калибровки средства измерительной техники оформляются в виде сертификата калибровки, в котором представляются в виде таблицы показания средства измерительной техники в каждой калибруемой точке диапазона измерений с соответствующими расширенными неопределенностями и указанием коэффициента охвата.

Таблица 1

| Значение входной величины | Стандартная неопределенность по типу А $u_A$ , % | Стандартная неопределенность по типу В, % |          | Суммарная стандартная неопределенность $u_c$ , % | Коэффициент охвата $k$ при $P=0,95$ | Расширенная неопределенность $U$ , % |
|---------------------------|--|---|----------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
|                           |  | $u_{Bst}$                                 | $u_{Bd}$ |  |                                     |                                      |
| 1,00 g                    | 0,04   | 1,10                                      | 0,03     | 1,10   | 2                                   | 2,20                                 |
| 160,00 Гц                 | 0,02   | 0,11                                      | 0,0003   | 0,03   | 2                                   | 0,06                                 |

Таблица 2

| Значение входной величины, В | Стандартная неопределенность по типу А $u_A$ , % | Стандартная неопределенность по типу В, % |          | Суммарная стандартная неопределенность $u_c$ , % | Коэффициент охвата $k$ при $P=0,95$ | Расширенная неопределенность $U$ , % |
|------------------------------|--|---|----------|--|-------------------------------------|--------------------------------------|
|                              |  | $u_{Bst}$                                 | $u_{Bd}$ |  |                                     |                                      |
| 3,5                          | 0,08   | 0,06                                      | 0,09     | 0,13   | 2                                   | 0,26                                 |

Таблица 3

| Значение входной величины, кгс/см <sup>2</sup> | Стандартная неопределенность по типу А $u_A$ , кгс/см <sup>2</sup> | Стандартная неопределенность по типу В, кгс/см <sup>2</sup> |          |          | Суммарная стандартная неопределенность $u_c$ , кгс/см <sup>2</sup> | Коэффициент охвата $k$ при $P=0,95$ | Расширенная неопределенность $U$ , кгс/см <sup>2</sup> |
|--|--|---|----------|----------|--|-------------------------------------|--|
|  |  | $u_{Bst}$   | $u_{Bd}$ | $u_{Bn}$ |  |                                     |  |
| 10,00  | 0,04   | 0,01  | 0,14     | 0,08     | 0,62   | 2                                   | 0,32   |

## **Выводы**

Изложенная методика расчета неопределенности измерений при калибровке виброметра 795M107B в комплекте с акселеромером АС102–1А, измерительного канала переменного напряжения измерительно-вычислительного комплекса типа МІС и манометра типа МТ позволяет рассчитывать неопределенность измерений при калибровке данных типов средств измерительной техники методом непосредственных измерений.

## **Список использованной литературы**

1. Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність»// Відом. Верховної Ради (ВВР). – 2014. – № 30. – С. 1008.
2. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC17025:2005, IDT): ДСТУ ISO/IEC17025:2006. – К.: Держспоживстандарт України, 2007. – 26 с.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. – Geneva: ISO, 1993. – 101 p.
4. Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні (Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration): ЕА–4/02 М:2013. – Європейська асоціація з акредитації, 2013. – 75 с.
5. 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 20.12.2017