УДК 389.14:53.083

С.Ф. Левин

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия

СТАНДАРТИЗОВАННЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОВЕРКИ ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В статье рассмотрен пример расчета расширенной неопределенности поверки термопреобразователей сопротивления Приложения В ГОСТ 8.461–2009. Показано, что строгое следование положениям этого стандарта приводит в примере к противоположному результату. Причина грубой ошибки – несоответствие «Руководства по выражению неопределенности измерения» и его аутентичного перевода в виде ГОСТ Р 54500.3–2011 положениям ГОСТ Р 50779.21–2004.

Ключевые слова: *расширенная неопределенность, доверительная вероятность, уровень доверия.*

Введение

В 2015 году в № 3 журнала «Советник метролога» главный метролог Института прикладной физики, цитируя ГОСТ Р 54500.3–2011 [1], прорекламировал пример расчета расширенной неопределенности поверки термопреобразователей сопротивления (ТСП) ГОСТ 8.461–2009 [2], утверждая, что «метролог, проведший такой расчет, начинает понимать причины, вносящие вклад в образование неопределенности результата измерений (поверки, калибровки) и способы оценки этих вкладов и суммарной неопределенности».

Этот пример рассмотрен ниже.

Пример ГОСТ 8.461–2009

ТСП Pt 100 класса А по ГОСТ 6651 с допуском ±0,34 °С при t = 95 °С предполагается поверить в лаборатории в водяном термостате с нестабильностью $\Delta_{ст}$ = ±0,02 °С и неравномерностью температуры a_F = ±0,01 °С эталонным ТСП с расширенной неопределенностью (доверительной погрешностью при доверительной вероятности 0,95!) $U_э$ = ±0,12 °С (1/3 допуска) при t = 100 °С и нестабильностью между поверками $a_э$ = ±0,05 °С при помощи моста постоянного тока с пределом основной допускаемой погрешности $a_э$ = ±0,002 Ом и СКО результата измерения сопротивления ТСП $u(r_{lab})$ = 0,005 Ом.

Бюджет неопределенности измерения для температуры в термостате дан в таблице 1, а для сопротивления поверяемого ТСП – в таблице 2.

Суммарная стандартная неопределенность поверки согласно формуле (19) [2] при

C_2 = 0,385 Ом/°С $u_c(R)$ = 0,0262 Ом.

Тогда при k = 2 расширенная неопределенность поверки U_R = 0,0524 Ом или в температурном эквиваленте U_t = 0,136 °С.

Вывод: Комплекс средств пригоден для поверки ТСП класса А при t = (95±3) °С (согласно п.6.8 [2] расширенная неопределенность поверки должна быть не менее чем в два раза меньше допуска поверяемых ТСП, т.е. не более 0,17 °С).

Таблица 1

Бюджет неопределенности измерения температуры в термостате

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности	Коэффициент чувствительности	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при пяти измерениях $u(r_{lab-5}) = u(r_{lab})/\sqrt{5}$	0,0022 (тип А)	1/0,385	0,0058
Нестабильность температуры в термостате $u(t_S) = \Delta_{ст}/\sqrt{3}$	0,0116 (тип В)	1	0,0116
Градуировка эталонного термопреобразователя $u(\delta t_э) = U_э/2$	0,06 (тип А)	1	0,06
Электроизмерительная установка $u(\delta r_S) = \Delta_{пр}/3$	0,00067 (тип В)	1/0,385	0,0017
Нестабильность эталонного термопреобразователя за межповерочный интервал $u(\delta t_T) = a_э/\sqrt{3}$	0,0289 (тип В)	1	0,0289
Суммарная стандартная неопределенность температуры $u_c(t_x)$, °С	0,068		

© С.Ф. Левин

Таблица 2

Бюджет неопределенности
измерения сопротивления поверяемого термопреобразователя сопротивления

Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности	Коэффициент влияния	Вклад в суммарную стандартную неопределенность
Случайные эффекты при измерении $u(r_{lab-5}) = u(r_{lab})/\sqrt{5}$	0,0022 (тип А)	1	0,0022
Электроизмерительная установка $u(\delta r_k) = \Delta_{пр}/3$	0,00067 (тип В)	1	0,00067
Перепад температур в рабочем объеме $u(\delta t_F) = a_F/\sqrt{3}$	0,0058 (тип В)	0,385	0,0022
Суммарная стандартная неопределенность сопротивления $u_c(R_k)$, Ом	0,0032		

Проверка расчетов в примере

Напомним, что неопределенность поверки ТСП – неопределенность результата измерения сопротивления ТСП при заданной температуре (п.3.11 [2]) и при допуске

$$\pm(0{,}34\ °C)\times(0{,}385\ Ом/°C) = 0{,}1309\ Ом.$$

Вычисления без округлений промежуточных результатов показывают, что U_R = 0,05270679906 Ом или U_t = 0,136907768 °C.

Но по условиям примера $u(r_{lab})$ = 0,005 Ом является СКО результата измерения сопротивления эталонного ТСП. А согласно п.11.4.1 [2] «стандартную неопределенность, обусловленную случайными эффектами при измерениях $u(r_{lab1-j})$, рассчитывают как СКО среднего значения результатов измерений, выполненных в одном измерительном цикле эталонным термометром по формуле

$$u(r_{lab1-j}) = u(r_{lab1})/\sqrt{N_j}, \qquad (5)$$

где $u(r_{lab1})$ – СКО единичного измерения температуры эталонного термометра, определенное по 9.3; N_j – число измерений в одном измерительном цикле».

В то же время согласно п.9.3.2 [2] «проводят не менее 50 отсчетов сопротивления и рассчитывают СКО результата измерения». «Значение СКО $u(r_{lab})$ рассчитывают либо автоматически измерительным мостом, либо, при регистрации поверителем отдельных отсчетов, по формуле

$$u(r_{lab}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{lab}} \frac{(R_i - R_s)^2}{N_{lab} - 1}}, \qquad (1)$$

где N_{lab} – число отсчетов сопротивления ТСП; R_i – результат i-го отсчета; R_s – среднее значение сопротивления».

Другими словами, в рассматриваемом примере «СКО единичного измерения» должно составить не менее (0,005 Ом)×√50 ≈ 0,0354 Ом, а «оценка» стандартной неопределенности случайных эффектов при 5 измерениях – 0,0354/√5 Ом ≈ 0,0158 Ом.

И бюджет неопределенности принимает другой вид (табл. 3).

Таблица 3

Уточненный бюджет неопределенности

Бюджет	Источник неопределенности	Оценка стандартной неопределенности	Коэффициент влияния	Вклад в u_c
эталон-ный ТСП	Случайные эффекты при измерении $u(r_{lab-5}) = u(r_{lab})/\sqrt{5}$	(0,0354 Ом)/√5 = = 0,0158 Ом	1	0,0158 Ом
	Нестабильность температуры в термостате $u(t_S) = \Delta_{ст}/\sqrt{3}$	(0,02 °C)/√3 = = 0,0116 ºC	0,385 Ом/ºC	0,00445 Ом
	Градуировка эталонного ТС $u(\delta t_э) = U_э/2$	(0,12/2) ºC = = 0,06 ºC	0,385 Ом/ºC	0,0231 Ом
	Электроизмерительная установка $u(\delta r_S) = \Delta_{пр}/3$	(0,002 Ом)/3 = = 0,00067 Ом	1	0,00067 Ом
	Нестабильность за межповерочный интервал $u(\delta t_T) = a_э/\sqrt{3}$	(0,05 ºC)/√3 = = 0,0289 ºC	0,385 Ом/ºC	0,01111 Ом
поверяе-мый ТСП	Случайные эффекты при измерении $u(r_{lab-5}) = u(r_{lab})/\sqrt{5}$	(0,0354 Ом)/√5 = = 0,0158 Ом	1	0,0158 Ом
	Электроизмерительная установка $u(\delta r_k) = \Delta_{пр}/3$	(0,002 Ом)/3 = = 0,00067 Ом	1	0,00067 Ом
	Перепад температур в рабочем объеме $u(\delta t_F) = a_F/\sqrt{3}$	(0,01 ºC)/√3 = = 0,0058 ºC	0,385 Ом/ºC	0,00222 Ом
Суммарная стандартная неопределенность поверки $u_c(R)$, Ом		0,03437951134 ≈ 0,0344		

Таким образом, расширенная неопределенность поверки

$$U_R = 0{,}0688 \text{ Ом}$$

или в температурном эквиваленте

$$U_t = 0{,}1787 \text{ °C}.$$

Но

$$(0{,}34 \text{ °C})/(0{,}1787 \text{ °C}) < 2!$$

И вывод о пригодности комплекса средств поверки ТСП становится противоположным.

Вот к чему привела пропущенная единичка.

И как поется в старинной английской песенке, «оттого, что в кузнице не было гвоздя…».

Еще один способ проверки указан в п.7.1 ГОСТ Р 50779.21–2004 [3]: «Если необходимо знать просто среднее значение показателя точности, то определяется точечная оценка σ^2 или σ, а если необходима уверенность в том, что точность не хуже (разброс не выше) определенного значения, то определяют интервальную оценку σ^2 или σ с верхней доверительной границей».

Тогда используют Таблицу квантилей распределения χ^2, т.е. оценки стандартной неопределенности по типу А для случайных эффектов при пяти измерениях надо умножать на ~2,9!

Ситуация резко меняется, если от оценивания параметров распределений перейти к долям [3].

И хотя это – стандартная процедура математической статистики, но именно в этом и состоит различие между «реалистическими» и «безопасными» оценками [1].

А правильные их названия, «точечные» и «интервальные», скрыты «замысловатыми» с точки зрения стандартизованной терминологии рассуждениями в Приложении Е [1].

Однако для математической статистики проверка на этом не заканчивается, т.к. в табл. 2 [2] указано пять, а в табл. 3 [2] – шесть распределений вероятностей, но их видов только два – равномерное (тип В) и нормальное (тип А), причем все соответствующие величины согласно формуле (18) [2] представлены как независимые.

Это значит, что строгий расчет расширенной неопределенности поверки ТСП согласно [2] может быть основан и на композиции этих распределений.

Заметим, что композиция отличается от свертки наличием неединичного якобиана преобразования, представляющего собой определитель матрицы частных производных выходных переменных по входным переменным функции, используемой в методе косвенного измерения.

Стандарт [1] допускает применение свертки для решения измерительной задачи [2], но при этом пугает целым рядом «трудностей», откуда следует, что разработчики этих стандартов даже не пытались их преодолеть.

Проблема еще и в том, что «СКО результата измерения» или «СКО среднего значения» является ненаблюдаемой или фиктивной величиной.

Оценить практически «СКО среднего значения» можно, выполнив хотя бы столько циклов измерений с усреднением, сколько было измерений в одном цикле, а полученные средние усреднить.

Но СКО единичного измерения не изменится.

Правда, если принять данные бюджета за точные значения параметров распределений, то доля их свертки в допуске должна быть не менее 95 %.

Но тогда результат поверки ТСП с таким расчетом распространяется не на отклонение от номинальной статической характеристики, описываемое распределением вероятностей, а только на параметр положения этого распределения.

И все-таки существенная составляющая «неопределенности» в бюджете осталась неучтенной. В [1] и [4] она связана с аппроксимациями и предположениями, в Международном словаре 2007 года [5] она названа «дефинитной», а в РМГ 29–2013 [6] – «дефинициальной неопределенностью».

Ее связывают с детализацией моделей измерений, но этими моделями являются и распределения вероятностей.

Анализ типовых распределений в измерительных задачах поверки средств измерений показывает, что соответствующая «дефинициальной неопределенности» погрешность неадекватности сопоставима с характеристиками точности эталонов.

Заключение

«Хотя настоящее Руководство устанавливает общую методологию оценивания неопределенности, его применение требует от пользователя критического мышления, интеллектуальной честности и компетентности.

Оценивание неопределенности нельзя рассматривать как типовую задачу, требующую применения стандартных процедур.

От пользователя требуется детальное знание природы измеряемой величины и процедуры измерения.

Поэтому качество оценки неопределенности, приписанной результату измерения, зависит, в конечном счете, от понимания, критического анализа и профессиональной добросовестности всех лиц, принимающих участие в ее получении» [1].

Сознательно или неосознанно, эти пожелания обесценивает подмена расчетами [1] стандартных процедур ГОСТ Р 50779.21–2004 [3], разработанного с учетом положений стандарта ИСО

2854:1976. За рубежом его отменять не собираются, а список казусов неопределенности [7–19] только растет.

Правда, текст [1] отличается правильным определением термина «толерантный интервал» от оригинала ISO/IEC Guide 98-3:2008.

Но это скорее минус, чем плюс – формулы-то те же…

При этом особая благодарность специалистам ВНИИМС за предоставленный текст оригинала.

Список литературы

1. ГОСТ Р 54500.3–2011/Руководство ИСО/МЭК 98-3: 2008. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

2. ГОСТ 8.461–2009 ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Методика поверки.

3. ГОСТ Р 50779.21–2004 Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение.

4. Руководство по выражению неопределенности измерения. СПб: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.

5. Международный словарь по метрологии: Основные и общие понятия и соответствующие термины. СПб: НПО «Профессионал», 2009.

6. РМГ 29–2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

7. Левин С.Ф. Метрология. Математическая статистика. Легенды и мифы 20-го века: Легенда о неопределенности / С.Ф. Левин // Партнеры и конкуренты. – 2001. – № 1. – С. 13–25.

8. Левин С.Ф. Теория погрешностей: старая парадигма и «новые» альтернативы / С.Ф. Левин // Метрология. – 2007. – С. 3–18.

9. Левин С.Ф. Неопределенность в узком и широком смыслах результатов поверки средств измерений / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2007. – № 9. – С. 15–19.

10. Левин С.Ф. Проблема доверительной вероятности / С.Ф. Левин // Измерительная техника. – 2008. – № 9. – С. 33–39.

11. Левин С.Ф. Нерешенные проблемы неопределенности / С.Ф. Левин // Главный метролог. – 2009. – № 4. – С. 13–24.

12. Левин С.Ф. Нерешенные проблемы «Руководства по выражению неопределенности измерения» / С.Ф. Левин // Метрология. – 2009. – № 7. – С. 3–21.

13. Левин С.Ф. Нужны ли «Пояснения по оценке результатов измерений» к «Руководству по выражению неопределенности измерения»? / С.Ф. Левин // Советник метролога. – 2011. – № 2. – С. 49–56.

14. Левин С.Ф. «Руководство по выражению неопределенности измерения» и измерительные задачи обеспечения единства измерений / С.Ф. Левин // Системи обробки інформації. – 2011. – № 6(96). – С. 9–14.

15. Левин С.Ф. Об искажении некоторых метрологических представлений в связи с опубликованием руководств в области выражения дисперсии измерении / С.Ф. Левин // Главный метролог. – 2012. – № 3. – С. 7–12.

16. Левин С.Ф. Метрологию в расход или расход в метрологию / С.Ф. Левин // Главный метролог. – 2012. – № 6. – С. 21–30.

17. Левин С.Ф. ГОСТ Р 54500–2011 как зеркало русской революции в GUM / С.Ф. Левин // Главный метролог. – 2014. – № 1. – С. 4–10.

18. Левин С.Ф. Нормативные проблемы метрологии и метрологического обеспечения / С.Ф. Левин // Главный метролог. – 2015. – № 4. – С. 16–35.

19. Левин С.Ф. Измерительная задача определения модуля полного импеданса элемента цепи / С.Ф. Левин // Системи обробки інформації. – 2015. – Випуск 6 (131). – С. 116–118.

Поступила в редколлегию 28.04.2016

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

СТАНДАРТИЗОВАНИЙ ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПЕРЕВІРКИ ТЕРМОПЕРЕТВОРЮВАЧА ОПОРУ

С.Ф. Левін

У статті розглянуто приклад розрахунку розширеної невизначеності повірки термоперетворювачів опору Додатку В ГОСТ 8.461-2009. Показано, що суворе дотримання положень цього Стандарту призводить в прикладі до протилежного результату. Причина грубої помилки – невідповідність «Керівництва по виразу невизначеності вимірювання» і його автентичного перекладу у вигляді ГОСТ Р 54500.3-2011 положенням ГОСТ Р 50779.21-2004.

Ключові слова: *розширена невизначеність, довірча ймовірність, рівень довіри.*

THE STANDARDIZED EXAMPLE OF CALCULATION OF UNCERTAINTY VERIFICATION OF THE THERMO CONVERTER OF RESISTANCE

S.F. Levin

In article the calculation example of expanded uncertainty in verification procedure of resistance thermo converters from Appendix GOST 8.461–2009 is considered. It is shown, that strict following to positions of this standard leads in an example to opposite result. The gross blunder reason – discrepancy «Guide to the expression of uncertainty in measurement» and its authentic transfer in the form of GOST R 54500.3–2011 positions of GOST R 50779.21–2004.

Keywords: *expanded uncertainty, confidence probability, confidence level.*