

УДК 006.91.001:53.088.2

И.П. Захаров

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ДОСТОВЕРНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ИХ ТОЧНОСТИ

Рассмотрены понятия «достоверность метрологических операций» и «достоверность оценок точности метрологических операций». Определены требования к допустимой достоверности оценок точности.

достоверность метрологических операций, достоверность оценок точности метрологических операций

Введение

Измерения являются неотъемлемым элементом в подавляющем большинстве областей практической деятельности человека. При этом надежность решений, принимаемых на основе результатов измерений, зависит от точности последних. Кроме того, точность измерений зачастую определяет уровень материальных затрат в производственных и непромышленных сферах. Именно поэтому повышение точности измерений является одной из

важнейших проблем современной метрологии [1].

Наиболее очевидным способом решения этой проблемы является совершенствование методов и средств измерений. Однако этот путь сопряжен с существенными материальными затратами на разработку эталонной базы как основы обеспечения единства измерений и модернизацию парка рабочих средств измерительной техники (СИТ). Достаточно сказать, что разработка государственного эталона, стандартного образца или рабочего СИТ обходится в сотни тысяч гривен.

Другой путь заключается в совершенствовании методов обработки результатов измерений путем наиболее полного использования измерительной информации, получаемой в процессе реализации той или иной метрологической операции.

Целью настоящей статьи является рассмотрение вопросов достоверности измерений, проводимых при реализации метрологических операций, а также достоверности оценок, получаемых в результате их реализации.

Достоверность метрологических операций. Анализ метрологических операций показывает, что все их многообразие можно разделить на две группы в зависимости от вида шкал, в которых выражены их результаты: операции оценивания и операции контроля.

К операциям оценивания относятся: измерение (measurement); калибровка, градуировка (calibration); сличение (comparison); аттестация (certification).

Эти операции связаны с передачей размера единицы. Их результатом является численное значение оцениваемой величины и характеристики его рассеяния (среднее квадратическое отклонение (СКО) или доверительные границы погрешности, суммарная стандартная или расширенная неопределенности), выраженные в шкале интервалов или отношений.

К операциям контроля относятся: поверка (verification); испытания (testing); метрологический контроль (monitoring). Результатом таких операций является диагноз – логическая функция в формате «истина» или «ложь»: «годен» или «не годен», выраженная в шкале порядка.

Важнейшей характеристикой метрологических операций является степень доверия к ее результатам (достоверность результатов). Для двух разных групп операций эти характеристики различны: для операций оценивания – это характеристики их точности (указываемые при записи результата измерения), а для операций контроля – вероятность правильности (неправильности) поставленного диагноза.

Так, авторы статьи [2] пишут: “Достоверным считается результат, погрешность которого не выходит за предписанные рамки $|\xi - x| \leq e$, где x – точное значение; ξ – приближенное значение искомого параметра, полученное численно; e – заданная допустимая величина погрешности”.

Володарский Е.Т. в книге [3] указывает: „Качество процедуры контроля, степень его правдоподобности характеризуется достоверностью контроля. Количественной оценкой достоверности есть вероятность того, что результат контроля отвечает действительному состоянию объекта”.

Следует отметить, что в процессе реализации всех операций контроля проводятся измерения, поэтому при оценивании достоверности операций этой группы можно также говорить о погрешности (не-

определенности) измерений, выполняемых в процессе выполнения поверки, испытаний, контроля. В п. 5.10.3.1 (с) стандарта ISO/IEC 17025:2005 указывается: „Информация о неопределенности нужна в протоколах испытаний тогда, когда она имеет отношение к достоверности или применению результатов испытаний, когда того требует инструкция заказчика или когда неопределенность влияет на соответствие пределу, указанному в технических условиях”.

Достоверность характеристик точности измерений. Необходимо отметить, что поскольку результатом измерения является не только численное значение измеряемой величины, но и характеристики его точности, то при оценивании достоверности измерительных операций следует определять также достоверность характеристик точности. Так, Земельман М.А. в своей монографии [4] отмечает: “Погрешности этих погрешностей ... служат как бы мерой доверия к самим характеристикам погрешностей измерений”.

Как правило “погрешность погрешности” не указывается при записи результата измерения. В литературе приводятся различные противоречивые требования к оцениванию “погрешности погрешности”. В монографии [4] говорится о том, что эта величина может характеризоваться значениями 15 – 20 %. Это мотивируется тем, что, во-первых, погрешности измерений – величины существенно меньшие по сравнению с результатами измерений: “погрешности этих погрешностей – величины второго порядка малости; ... и, в отличие от последних, ни в каких расчетах не участвуют”. Во-вторых, на точность оценивания погрешности оказывает неконтролируемое влияние большое количество факторов, к которым относятся: “приближенность принятой модели объекта измерений и моделей погрешностей измерений; приближенность методов расчета и методов экспериментального оценивания; изменчивость во времени как характеристик погрешности, так и условий измерений; многообразие возможных совокупностей значений влияющих величин и др.”

Однако при исключении систематических погрешностей точность их определения не должна ухудшать точность проводимых измерений, а поэтому должна быть выше точности последних, а при применении взвешенной оценки погрешности (СКО) непосредственно входят в формулу для результата измерений [5]. Что же касается второго тезиса, то при равных влияющих факторах оценивание погрешности будет тем точнее, чем точнее будет выбран метод оценивания и суммирования составляющих.

Следует отметить, что при записи погрешности обязательно указывается вероятность, что является одним из условий обеспечения единства измерений: „... характеристики погрешностей или неопределен-

ности измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные границы” [6].

При этом характеристики точности и вероятность полностью взаимосвязаны при известном законе распределения измеряемой величины.

Так, доверительная вероятность p связана с расширенной неопределенностью U (доверительными границами погрешности) следующим выражением:

$$p = \int_{-U}^U g(y) dy = G(U) - G(-U), \quad (1)$$

где $g(y)$ и $G(U)$ – дифференциальная и интегральная функции распределения, соответственно.

При симметричном законе распределения

$$p = 2 \int_0^U g(y) dy = 2G(U), \quad (2)$$

отсюда

$$U = G^{-1}(p/2). \quad (3)$$

Погрешность задания доверительной вероятности в нормативных документах не указана. Задавая ее в виде $\pm Dp$ и используя (3) в качестве модельного уравнения, можно получить погрешность оценки расширенной неопределенности в виде

$$\Delta U = \left[G^{-1}\left(\frac{p+\Delta p}{2}\right) - G^{-1}\left(\frac{p-\Delta p}{2}\right) \right] / 2. \quad (4)$$

В большинстве случаев (при соблюдении центральной предельной теоремы теории вероятности) закон распределения $g(y)$ считается нормальным или законом Стьюдента с известным числом степеней свободы.

Для нормированного нормального закона распределения зависимость DU/Dp для малых Dp линейная:

$$DU = 0,8 Dp. \quad (5)$$

При записи выражении (5) через приведенные погрешности $\delta U = DU/1,96$; $\delta p = Dp/0,95$, для доверительной вероятности $p = 0,95$ получаем следующее выражение

$$\delta U = 0,39 \delta p. \quad (6)$$

Таким образом, при выражении расширенной неопределенности (доверительных границ погрешности) для погрешности округления $\pm 0,005$ для доверительной вероятности $0,95$ погрешность δU должна лежать в пределах $\pm 2\%$. Эта погрешность соответствует округлению значения расширенной неопределенности до трех значащих цифр. Погрешность же расширенной неопределенности $10 - 17\%$, вытекающая из правила представления неопределенности одной – двумя значащими цифрами, приводит к разбросу доверительной вероятности соответственно от $0,92 - 0,97$ до $0,91 - 0,98$, что, в соот-

ветствии с ГОСТ 11.001-73 для односторонних доверительных интервалов для рядов предпочтительных чисел $R_{25} - R_{26}$, может привести к переходу к другой доверительной вероятности ($0,9$ и $0,99$).

Для закона Стьюдента получена эмпирическая зависимость DU/Dp для малых Dp :

$$DU = 0,41 \cdot t_{0,95} \cdot n \cdot Dp. \quad (7)$$

При записи выражении (7) через приведенные погрешности $\delta U = DU/1,96$; $\delta p = Dp/0,95$, для доверительной вероятности $p = 0,95$ получаем следующее выражение

$$\delta U = 0,39 \delta p \frac{t_{0,95} \cdot n}{t_{0,95} \cdot \infty}. \quad (8)$$

Таким образом, при выражении расширенной неопределенности (доверительных границ погрешности) для погрешности округления $\pm 0,005$ для доверительной вероятности $0,95$ погрешность δU должна лежать в пределах от $\pm 2\%$ для $n = \infty$ до для 13% для $n = 1$. Большее значение погрешности при малом числе наблюдений соответствует округлению значения расширенной неопределенности до двух значащих цифр.

Допустимая достоверность оценивания точности измерений. Несмотря на кажущуюся, на первый взгляд, несущественность, точность оценивания показателей точности является далеко не второстепенным фактором. Так, в соответствии с ГОСТ 8/011-72, на всю нормативно-техническую и конструкторско-технологическую документацию распространялось правило округления результатов измерений: наименьшие разряды числовых значений результата измерения и числовых показателей точности должны быть одинаковы. Это правило продиктовано необходимостью обеспечения достоверности результатов измерений, в первую очередь, научных исследований и измерений высокой точности. При передаче продукции, когда, как отмечают Семенов Л.А., Фридман А.Э [7], происходит смена ее собственника, выполнение этого правила, особенно когда речь идет о торговле электроэнергией и энергоносителями, приводит к потерям в десятки и даже сотни тысяч у.е. Левин С.Ф. напрямую связывает “катастрофический феномен 1985 – 1986 годов” в авиационной и ракетно-космической технике с погрешностями измерений и вычислений [8]. В ряде областей, в частности медицине и фармакологии, где нахождение интервальных оценок производится с вероятностью $0,99$, вопрос достоверности оценивания погрешности приобретает жизненно важный характер.

Большое влияние оказывает достоверность оценок точности измерений на качество выполнения метрологических работ. Действительно, анализ

классов точности СИТ в соответствии с ГОСТ 8.401-80 показывает, что относительная разность между ними составляет от 17 до 40 % (табл. 1).

Таблица 1
Анализ классов точности СИТ

Г	1,0·10 ⁿ	1,5·10 ⁿ	2,0·10 ⁿ	2,5·10 ⁿ
д, %	-33	-25	-20	-17
Г	3·10 ⁿ	4·10 ⁿ	5·10 ⁿ	6·10 ⁿ
д, %	-25	-20	-17	-40

Поэтому повышение точности оценивания погрешности СИТ при проведении госиспытаний или метрологической аттестации более чем на 17 %, позволяет в ряде случаев повысить класс точности СИТ без дополнительных затрат на их модернизацию.

При проведении поверочных работ обычно (для повышения их производительности) ограничиваются 3-5 повторными наблюдениями при вычислении среднего арифметического результата измерения, а при выполнении аналитических измерений – проведением параллельных измерений (то есть двумя повторными наблюдениями). Следует отметить, что получаемая при этом оценка СКО среднего арифметического имеет собственное относительное СКО, равное 35 – 70 %, доверительные же границы погрешности оценки СКО при уменьшении числа повторных наблюдений с 10 до 2 – 3 увеличиваются в 2 – 6 раз. Недостоверность получаемых при проверке оценок точности может привести к необнаруженному или фиктивному браку СИТ [5].

Достоверность оценивания точности важна еще и в тех случаях, когда погрешности результатов измерений являются входными данными при анализе погрешностей других измерений и, трансформируясь уравнением измерения, влияют на погрешность их результата. Так, например, из уравнения измерения в виде степенной функции $y = x^m$ следует увеличение относительной погрешности выходной величины y в M раз по сравнению с относительной погрешностью входной величины x . Известно, что при выполнении действующего правила округления погрешностей результатов измерений, при одной значащей цифре предельная погрешность округления составит 5-17 %, а при двух значащих цифрах 3,5 – 10 %. Именно поэтому при оценивании погрешности входных величин рекомендуется увеличивать число разрядов. Добавление дополнительного разряда при указании погрешностей промежуточных результатов позволяет уменьшить эту погрешность при тех же правилах округления до значений 0,5 – 1,7 % при трех значащих цифрах и 0,35 – 1,0 % при четырех значащих цифрах, что, очевидно, является требованием к оцениваемой точности погрешности промежуточных измерений.

Достоверность оценок точности сказывается и на длительности межповерочного интервала [16], уменьшение которого приводит к неоправданным затратам на проведение дополнительных проверок, а увеличение – к снижению метрологической надежности СИТ. От достоверности оценки точности первичных государственных эталонов напрямую зависят погрешности нижестоящих. Значительные затраты на проведение ключевых сличений, а также влияние их точности на систему обеспечения единства (прослеживаемости) измерений являются стимулом постоянного совершенствования способов обработки и оценивания точности результатов измерений в этой области.

Выводы

Достоверность метрологических операций оценивания и контроля выражается разными показателями, однако при необходимости в качестве показателя достоверности может быть указана неопределенность (погрешность) измерений, выполняемых при реализации операций контроля. Исходя из погрешности округления значений доверительной вероятности при записи результатов измерений, обоснована необходимость представления расширенной неопределенности с 2 – 3 значащими цифрами, в зависимости от эффективного числа степеней свободы. Показано влияние достоверности оценок точности на достоверность реализации метрологических операций.

Список литературы

1. *Актуальные проблемы метрологии в радиоэлектронике / Под ред. В.К. Коробова. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 296 с.*
2. *Житников В.П., Шерыхалина Н.М. Оценка достоверности численных результатов при наличии нескольких методов решения задачи // Вычислительные технологии. – 1999. – Том 4, № 6. – С. 77-87.*
3. *Володарський С.Т., Кухарчук В.В., Поджаренко В.О., Сердюк Г.Б. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю. – Вінниця: Велес, 2001. – 219 с.*
4. *Земельман М.А. Метрологические основы технических измерений. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 228 с.*
5. *Рабинович С.Г. Погрешности измерений. – Л.: Энергия, 1978. – 261 с.*
6. *Закон України „Про метрологію та метрологічну діяльність”. – К., 2004.*
7. *Семенов Л.А., Фридман Ф.Э. О целесообразности пересмотра правила округления результатов измерений // Измерительная техника. – 2004. – №11. – С. 56-58.*
8. *Левин С.Ф. Погрешности измерений и вычислений как причина “катастрофического феномена 1985-1986 годов” в авиационной и ракетно-космической технике // Контрольно-измерительные приборы и системы. – 2000. – №3. – С. 21-24.*

Поступила в редколлегию 9.01.2007

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