

УДК 681.2.083

А.Г. Чуновкина

ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, С.-Петербург, Россия

О РЕКОМЕНДАЦИИ КООМЕТ R/GM/14:2006 «РУКОВОДСТВО ПО ОЦЕНИВАНИЮ ДАННЫХ КЛЮЧЕВЫХ СЛИЧЕНИЙ КООМЕТ»

В статье обсуждаются алгоритмы обработки данных сличений, рекомендованные в Рекомендации КООМЕТ R/GM/14:2006. В настоящее время Рекомендации проходят апробацию в рамках ТК1.1 КООМЕТ «Общие вопросы измерений», одной из задач которого является научно-методическое руководство при обработке данных сличений эталонов Национальных метрологических институтов КООМЕТ.

ключевые сличения, опорное значение, транспортируемый эталон, степень эквивалентности

Введение

Целью региональных ключевых сличений (далее RMO КС) является распространение метрологической эквивалентности на большое число национальных метрологических институтов (далее НМИ), которые не принимали участие в ключевых сличениях СИРМ [1].

Степень эквивалентности эталонов НМИ, участвующих в RMO КС, определяется по отношению к опорному значению ключевых сличений СИРМ (далее KCRV СИРМ¹) через результаты измерений, полученные в тех НМИ, которые участвовали в обоих сличениях.

Региональные метрологические организации (RMO) в частности несут ответственность за то, чтобы:

- связь результатов RMO RC с KCRV СИРМ обеспечивалась с допустимо малой неопределенностью за счет достаточного числа связующих институтов, участвующих в обоих сличениях;
- процедуры, используемые в RMO КС, и алгоритмы оценки результатов были сопоставимы с теми, которые используются в соответствующих СИРМ КС.

Рабочая группа по неопределенности при Директоре ВРМ разработала руководство по оценке данных ключевых сличений СИРМ [2]. Руководство [2] содержит процедуры, которые позволяют вычислить KCRV, степени эквивалентности национальных эталонов по отношению к KCRV и степени их попарной эквивалентности при выполнении следующих условий:

- стабильность транспортируемого эталона;
- взаимная независимость результатов изме-

рений, представленных NMI;

- правомерность приписания гауссовского распределения измеряемой величине.

Также в [2] рассмотрена процедура оценивания данных КС СИРМ, когда последнее из перечисленных условий не выполняется.

Рекомендации КООМЕТ R/GM/14:2006 [3] согласованы с [2] в части условий применения, алгоритма вычисления KCRV и позволяют:

- 1) трансформировать результаты RMO КС с целью возможности их сопоставления с результатами СИРМ КС и оценить соответствующие неопределенности трансформированных данных;
- 2) установить степень эквивалентности эталона НМИ по отношению к KCRV СИРМ, включая оценивание соответствующих неопределенностей для случаев одного и нескольких связующих институтов.

Алгоритмы применимы для оценки данных ключевых сличений RMO, когда выполняются следующие условия:

- транспортируемый эталон является стабильным;
- каждый национальный институт, участвующий в ключевых сличениях RMO, представил результат измерения и соответствующую суммарную стандартную неопределенность, а также бюджет неопределенности;
- для каждого института, участвующего в RMO сличениях на основе имеющейся информации распределение Гаусса может быть приписано измеряемой величине.

Процедура С предусматривает введение аддитивной поправки для результатов измерений, полученных в RMO сличениях. Значение поправки вычисляется на основе результатов измерений связующих институтов, представленных в ключевых сличениях СИРМ и ключевых сличениях RMO. Учитывая близость значений транспортируемых мер в

¹ Поскольку KCRV устанавливается только в ходе КС СИРМ, то при обозначении опорного значения можно опускать "СИРМ", и в сокращенно виде вместо KCRV СИРМ записывать KCRV.

CIPM и RMO КС, естественно предположить, что результаты связующих эталонов, полученные в CIPM и RMO КС, имеют одинаковые характеристики точности в абсолютной форме. Введение аддитивной поправки и неизменность точностных характеристик в абсолютной форме для процедуры С делают удобным оценивание неопределенностей измерений в абсолютной форме.

Процедура D предусматривает введение мультипликативной поправки для результатов измерений, полученных в RMO сличениях. При обработке данных в соответствии с Процедурой D дополнительно предполагается, что результаты связующих эталонов, полученные в CIPM и RMO КС, имеют одинаковые характеристики точности в относительной форме. Введение мультипликативной поправки и неизменность точностных характеристик в относительной форме для процедуры D делают удобным оценивание неопределенностей измерений в относительной форме.

Оценивание неопределенностей измерений выполняется для двух типовых ситуаций:

Результаты RMO КС независимы между собой и независимы с результатами CIPM КС, за исключением результатов связующих эталонов.

Некоторые результаты RMO КС коррелированы между собой или с результатами CIPM КС.

Основной причиной корреляции является заимствование размера единицы НМИ-участниками RMO КС. При этом возможны, например, следующие ситуации:

В RMO КС участвуют НМИ, которые заимствуют размер единицы у участников CIPM КС или RMO КС. В этом случае возникает пара «первичный – вторичный эталоны», результаты измерений, полученные с помощью этой пары, будут зависимы. Если в этом случае первичный эталон не является связующим, т.е. участвует в CIPM КС, но не участвует в RMO КС, то все равно возникает корреляция между результатом, полученным с помощью вторичного эталона, и CIPM КС, в образовании которого использовался результат, полученный с помощью первичного эталона;

НМИ-участники RMO КС заимствуют размер единицы у одного и того же НМИ, образуя пару «вторичный – вторичный эталоны». В этом случае результаты, полученные с помощью вторичных эталонов, будут зависимы независимо от того, участвует ли данный первичный эталон в CIPM КС или RMO КС.

Корреляция результатов измерений должна учитываться при вычислении неопределенности трансформированных результатов RMO КС, а также неопределенности степени эквивалентности.

Процедура С

При применении процедуры С трансформированные результаты сличений вычисляются по формулам:

мулам:

$$\tilde{x}'_i = \tilde{x}_i + \Delta$$

с соответствующей неопределенностью

$$u^2(\tilde{x}'_i) = u^2(\tilde{x}_i) + u^2(\Delta),$$

где \tilde{x}_i - результаты RMO КС; \tilde{x}'_i , $i > L$ - трансформированные результаты НМИ-участников RMO КС, за исключением результатов связующих институтов; Δ - аддитивная поправка.

В случае одного связующего НМИ, аддитивная поправка Δ и соответствующая неопределенность $u(\Delta)$ вычисляются по формулам:

$$\Delta = x^* - \tilde{x}^*; \quad u^2(\Delta) = 2S^2,$$

где x^* , \tilde{x}^* - результаты измерений, полученные связующим НМИ в CIPM и RMO КС соответственно, а S - СКО результатов измерений, полученных в связующем НМИ, в условиях промежуточной прецизионности.

В случае нескольких связующих НМИ, аддитивная поправка вычисляется как средневзвешенное значение аддитивных поправок, вычисленных по результатам каждого связующего НМИ:

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^L \frac{\Delta_i}{S_i^2}}{\sum_{i=1}^L S_i^{-2}}; \quad u^2(\Delta) = \frac{2}{\sum_{i=1}^L S_i^{-2}},$$

где $\Delta_i = x_i^* - \tilde{x}_i^*$; L - число связующих НМИ.

Степень эквивалентности i -того НМИ оценивается по формуле:

$$d_i = \tilde{x}_i + \Delta - x_{\text{ref}},$$

где x_{ref} - CIPM КС, с соответствующей неопределенностью

$$u^2(d_i) = u^2(\tilde{x}_i) + u^2(x_{\text{ref}}) + u^2(\Delta) \left\{ 1 - u^2(x_{\text{ref}}) \times \sum_{i=1}^L u^{-2}(x_i^*) \right\},$$

если i -й НМИ не заимствует размер единицы у участников CIPM КС, и

$$u^2(d_i) \cong u^2(\tilde{x}_i) - u^2(x_{\text{ref}}) + u^2(\Delta) \left\{ 1 - u^2(x_{\text{ref}}) \times \sum_{i=1}^L u^{-2}(x_i^*) \right\},$$

если i -й НМИ заимствует размер единицы у какого-либо участника CIPM КС.

Степень эквивалентности для пары эталонов НМИ-участников RMO КС вычисляется по формуле:

$$d_{ij} = d_i - d_j = \tilde{x}_i - \tilde{x}_j;$$

$$u^2(d_{ij}) = u^2(\tilde{x}_i) + u^2(\tilde{x}_j) - 2 \text{cov}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j).$$

Степень эквивалентности пары эталонов, участник RMO КС и участник CIPM КС вычисляется

по формуле:

$$d_{ij} = \tilde{x}_i + \Delta - x_j$$

с соответствующей неопределенностью

$$u^2(d_{ij}) = u^2(\tilde{x}_i) + u^2(\Delta) + u^2(x_j) - 2 \text{cov}(\tilde{x}_i, x_j),$$

если участник СИРМ КС не является связующим НМИ, и

$$u^2(d_{ij}) = u^2(\tilde{x}_i) + u^2(x_j) - 2 \text{cov}(\tilde{x}_i, x_j),$$

если участник СИРМ КС является связующим НМИ.

Если выполняется следующее неравенство $|d_i| < 2u(d_i)$, то оценки неопределенностей результатов, заявляемые НМИ, согласуются с данными сличений, что является подтверждением соответствующих строк СМС.

Процедура D

При применении процедуры D трансформированные результаты вычисляются по формулам:

$$\tilde{x}'_i = \tilde{x}_i \cdot c;$$

$$u_{\text{rel}}^2(\tilde{x}'_i) = u_{\text{rel}}^2(\tilde{x}_i) + u_{\text{rel}}^2(c).$$

Индекс "rel" обозначает, что соответствующая характеристика точности использована в относительной форме задания.

В случае одного связующего НМИ, мультипликативная поправка c и соответствующая неопределенность $u_{\text{rel}}(\Delta)$ вычисляются по формулам:

$$c = \frac{x^*}{\tilde{x}^*}; \quad u_{\text{rel}}^2\left(\frac{x^*}{\tilde{x}^*}\right) = 2u_{\text{rel}}^2(x^*)(1 - \rho_i),$$

где x^*, \tilde{x}^* – результаты измерений, полученные связующим НМИ в СИРМ и RMO КС соответственно; ρ_i – коэффициент корреляции результатов измерений, полученных в i-м связующем НМИ, $u_{\text{rel}}(x^*) = u_{\text{rel}}(\tilde{x}^*)$.

В случае нескольких связующих НМИ, мультипликативная поправка вычисляется как средневзвешенное значение мультипликативных поправок, вычисленных по результатам каждого связующего НМИ:

$$c = \frac{\sum_{k=1}^L \frac{1}{u_{\text{rel}}^2(x_k^*)(1 - \rho_i)} \times \frac{x_k^*}{\tilde{x}_k^*}}{\sum_{k=1}^L \frac{1}{u_{\text{rel}}^2(x_k^*)(1 - \rho_i)}};$$

$$u_{\text{rel}}^2(c) = \frac{2}{\sum_{k=1}^L \frac{1}{u_{\text{rel}}^2(x_k^*)(1 - \rho_i)}}.$$

Степень эквивалентности i-го НМИ оценивается по формуле:

$$d_i = \tilde{x}_i \times c - x_{\text{ref}}$$

с соответствующей неопределенностью

$$u^2(d_i) = c^2 u^2(\tilde{x}_i) + u^2(x_{\text{ref}}) +$$

$$+ 2 \left(\sum_{k=1}^L \frac{1}{u^2(x_k^*)(1 - \rho_k)} \right)^{-1} \left(1 - u^2(x_{\text{ref}}) \sum_{k=1}^L \frac{1}{u^2(x_k^*)} \right),$$

если i-й НМИ не заимствует размер единицы у участников СИРМ КС, и

$$u^2(d_i) = c^2 u^2(\tilde{x}_i) - u^2(x_{\text{ref}}) +$$

$$+ 2 \left(\sum_{k=1}^L \frac{1}{u^2(x_k^*)(1 - \rho_k)} \right)^{-1} \left(1 - u^2(x_{\text{ref}}) \sum_{k=1}^L \frac{1}{u^2(x_k^*)} \right),$$

если i-й НМИ заимствует размер единицы у какого-либо участника СИРМ КС

Степень эквивалентности для пары эталонов НМИ-участников RMO КС вычисляется по формуле:

$$d_{ij} = d_i - d_j = c(\tilde{x}_i - \tilde{x}_j);$$

$$u^2(d_{ij}) = c^2 (u^2(\tilde{x}_i) + u^2(\tilde{x}_j) - 2 \text{cov}(\tilde{x}_i, \tilde{x}_j)).$$

Степень эквивалентности пары эталонов, участник RMO КС и участник СИРМ КС вычисляется по формуле:

$$d_{ij} = \tilde{x}_i \cdot c - x_j$$

с соответствующей неопределенностью

$$u^2(d_{ij}) = c^2 u^2(\tilde{x}_i) + u^2(x_j) + \frac{2}{\sum_{k=1}^L \frac{1}{u^2(x_k)(1 - \rho_i)}} - 2c \text{cov}(\tilde{x}_i, x_j),$$

если j-й НМИ не является связующим НМИ, и

$$u^2(d_{ij}) = c^2 u^2(\tilde{x}_i) + u^2(x_j) - 2c \text{cov}(\tilde{x}_i, x_j),$$

если j-й НМИ является связующим НМИ

Список литературы

1. *Mutual recognition of national standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes*, BIPM Publication, Sevres (France), 1999.
2. Cox M.G., *Metrologia*, vol. 39, P. 589-595, 2002.
3. *Рекомендации КОOMET R/GM/14:2006 «Руководство по оцениванию данных ключевых сличений КОOMET».*

Поступила в редколлегию 5.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, ст. научн. сотр. Ю.П. Мачехин, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.