

ОЦЕНИВАНИЕ ДАННЫХ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СЛИЧЕНИЙ КООМЕТ

Н.А. Бурмистрова¹, А.Г. Чунювкина², Н.Д. Звягин³

¹ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" (ВНИИМ), Санкт-Петербург, Россия, N.A.Burmistrova@vniim.ru

²ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" (ВНИИМ), Санкт-Петербург, Россия, A.G.Chunovkina@vniim.ru

³ФГУП "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева" (ВНИИМ), Санкт-Петербург, Россия, n.d.zviagin@vniim.ru

Аннотация

Рекомендации СООМЕТ R/GM/19:2016 "Руководство по оцениванию данных дополнительных сличений КООМЕТ" используются при обработке данных сличений КООМЕТ. Их апробация показала, что данная Рекомендация часто используется при оценивании двухсторонних сличений, поэтому случай обработки данных двухсторонних сличений был выделен при очередной актуализации данной рекомендации в рамках темы КООМЕТ 302/RU/04. Сейчас рекомендация находится на обсуждении и согласовании внутри ТК КООМЕТ.

Дополнительные сличения национальных эталонов обычно проводится с целью подтверждения измерительных и калибровочных возможностей (СМС) соответствующих национальных метрологических институтов (НМИ).

При оценивании данных дополнительных сличений подтверждаются неопределенности измерений, заявляемые участниками сличений, что является, по сути, подтверждением соответствующих калибровочных/измерительных возможностей. Измерительные/калибровочные возможности представляются в виде расширенных неопределенностей для уровня доверия 0,95 и не могут быть меньше, чем неопределенности измерений, заявленные участниками сличений.

В данной работе предлагается общая схема подтверждения СМС, которая описывает последовательность применяемых алгоритмов обработки и принятия решения, используя критерии χ^2 и E_n .

Ключевые слова: несогласованные данные; неопределенность; опорное значение; степени эквивалентности; СООМЕТ; СМС.

Введение

Для оценки данных дополнительных сличений КООМЕТ используется Рекомендация СООМЕТ R/GM/19:2016 [1]. Дополнительные сличения национальных эталонов проводятся с целью подтверждения измерительных и калибровочных возможностей (СМС) соответствующих национальных метрологических институтов. [2].

Рекомендация СООМЕТ R/GM/19:2016 была пересмотрена в 2016 году и в настоящее время, в связи с развитием новых метрологических методов и подходов к оцениванию данных, требуется актуализация. При актуализации был пересмотрен общий подход к оцениванию данных дополнительных сличений и был выделен случай двусторонних сличений.

В Рекомендация СООМЕТ R/GM/19:2016 рассматриваются два типа дополнительных сличений:

Тип I. Сличения первичных национальных эталонов, которые по разным причинам не были внесены в список ключевых сличений. Среди таких причин можно выделить загруженность Консультативных комитетов и интерес к данному виду сличений только у ограниченного числа НМИ. Сличения данного типа часто могут быть двухсторонними.

Схема проведения дополнительных сличений первого типа практически не отличается от схемы проведения ключевых сличений. Пилот-лаборатория рассылает транспортируемый эталон сравнения, участники сличений представляют результаты измерений с соответствующими неопределенностями, а также бюджет неопределенности измерений. Круговая, радиальная и смещенная схема сличений определяется свойствами эталона-сравнения, прежде всего его стабильностью.

Тип II. Сличения, как правило, вторичных национальных эталонов, которые заимствуют размер единицы у участников ключевых сличений. Участие таких НМИ в ключевых сличениях СИРМ проблематично, поскольку круг участников ключевых сличений СИРМ ограничен, прежде всего первичными национальными эталонами, которые имеют приблизительно один уровень точности, а также методами измерений, используемыми при проведении ключевых сличений. Для проведения дополнительных сличений данного типа необходимо привлечение референтной лаборатории, которая являлась бы участником ключевых сличений в данном виде измерений. Задача данной лаборатории определить опорное значение дополнительных сличений. Следует избегать смешивания терминов «опорное значение ключевых сличений» и «опорное значение дополнительных сличений». Дополнительные сличения типа II, как правило, проводятся строго с целью подтверждения СМС, поэтому в этом случае методика измерения при сличениях и методика калибровки идентичны. При оценивании данных этого типа сличений важен учет корреляций результатов измерений, возникающих вследствие заимствования размера единицы.

Общий подход к оцениванию данных дополнительных сличений

При пересмотре документа существенные изменения коснулись оценивания несогласованных данных сличений, а именно изложена общая схема оценивания данных сличений с применением критериев χ^2 и E_n . В данной статье сделан акцент на изложении общего подхода к оцениванию данных дополнительных сличений, прежде всего для сличений первого типа.

При оценивании данных дополнительных

сличений участники сличений представляют оценку измеряемой величины и соответствующую неопределенность измерений:

$$\{x_i, u(x_i)\}, i = 1, \dots, n$$

Первым шагом является проверка по критерию χ^2 .

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(x_i - x_w)^2}{u^2(x_i)} \quad (1)$$

где

$$x_w = \frac{\sum_1^n x_i}{\sum_1^n \frac{1}{u^2(x_i)}} \quad (2)$$

Если значение критерия, вычисленное по представленным НМИ данным, не превосходит критического значения χ^2 для уровня доверия 0,95 и числа степеней свободы $n - 1$

$$\chi^2 = \sum_1^n \frac{(x_i - x_w)^2}{u^2(x_i)} < \chi_{0,95}^2(n-1), \quad (3)$$

то данные разных НМИ могут быть признаны согласованными и в качестве опорного значения берется средневзвешенное значение результатов участников сличений с весами обратно пропорциональными квадратам соответствующих стандартных неопределенностей

$$x_{ref} = \frac{\sum_1^n \frac{x_i}{u^2(x_i)}}{\sum_1^n \frac{1}{u^2(x_i)}}, \quad u(x_{ref}) = \left(\sum_1^n \frac{1}{u^2(x_i)} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Если данные несогласованны, НМИ должны провести анализ причин несогласованности результатов. В результате анализа может быть установлено:

- Некоторые результаты измерения являются промахами (присутствуют существенные неучтенные систематические погрешности), и соответствующие НМИ принимают решение об исключении своих результатов. В этом случае их заявленные неопределенности не подтверждаются в ходе данных дополнительных сличений, и для их подтверждения необходимо участие в других аналогичных дополнительных сличениях;

- НМИ выявляют причины занижения заявленных неопределенностей и предоставляют эти причины пилот-лаборатории и другим участникам сличений. Участники сличений соглашаются с представленными объяснениями, после чего первоначально заявленные неопределенности увеличиваются так, чтобы можно было считать, что соответствующие неопределенности подтверждаются данными дополнительными сличениями.

Если не выявлено причин несогласованности, то для оценивания несогласованных данных в последней актуальной версии документа использовали метод наибольшего согласованного подмножества [3]. У этого метода есть ряд недостатков (опорное значение рассчитывается не по всем результатам, согласованное подмножество может быть не

единственным). После актуализации для несогласованных данных рекомендуется применение одного или комбинации двух методов обработки [4-11], основанных на формировании согласованного множества или на формировании множества попарно согласованных результатов.

После применения методов обработки несогласованных данных заявленные неопределенности участников сличений будут увеличены тем или иным образом и для подтверждения СМС данных используются уже результаты с новыми (увеличенными) неопределенностями. Методы различаются только выбором этих участников и обоснованием этого выбора. Существует два подхода:

В первом подходе отправной точкой является обеспечение выполнения критерия χ^2 ;

Во втором подходе отталкиваются от конечной практической цели сличений, т.е. подтверждения заявленных неопределенностей измерений, поэтому добиваются выполнения критерия E_n .

Примерами первого подхода могут служить такие алгоритмы оценивания несогласованных данных как Random effects modal (REM), Largest consistent subset (LCS) и т.д. REM основан на использование модели случайных эффектов, в которой предполагается наличие некой общей для всех участников неучтенной составляющей неопределенности, так называемой "dark uncertainty", которая имеет случайный характер. Существует несколько реализаций данного алгоритма: метод оценивания неучтенной составляющей DerSimonian-Laird (DL), метод оценки Mandel-Paule (MP), метод максимум функции правдоподобия (MLE) и другие.

Примером второго подхода может служить алгоритм оценивания несогласованных данных MCS [9], основанный на выполнении попарного критерия E_n для всех результатов измерений

$$E_n = \frac{|x_i - x_j|}{2\sqrt{u^2(x_i) + u^2(x_j)}} < 1. \quad (5)$$

В основе алгоритма MCS лежит принцип формирования согласованного множества результатов измерений путем индивидуального расширения неопределенности измерений каждого НМИ.

Этот подход, строго говоря, не обеспечивает выполнение критерия χ^2 . В этом случае требуется применением одного из методов, основанных на обеспечении критерия χ^2 . Однако следует признать, что вероятность такого события мала.

На данный момент ведутся работы по теме КОOMET 727/RU/17 «Разработка информационного материала "Модели обработки данных сличений национальных эталонов», где будут рассмотрены основные модели оценивания данных.

Подтверждение СМС данных. I тип

Для подтверждения СМС вычисляется опорное значение дополнительных сличений по согласованным данным. Это могут быть исходные данные участников сличений, если они согласованы,

или данным с увеличенными неопределенностями, полученными после обработки одним из методов [4-9]

$$x_{ref} = \frac{\sum_1^n x_i}{\sum_1^n \frac{1}{\tilde{u}^2(x_i)}}, \quad \tilde{u}(x_{ref}) = \left(\sum_1^n \frac{1}{\tilde{u}^2(x_i)} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Где $\tilde{u}(x_i) = u(x_i)$, если выполняется условие (3), то неопределенности остаются неизменными

$\tilde{u}(x_i) = \alpha_i \cdot u(x_i)$, - если не выполняется условие (3), то неопределенности увеличиваются в соответствии с выбранным методом обработки несогласованных данных. Коэффициенты α_i зависят от используемого метода.

Если для результата измерения $x_i, \tilde{u}(x_i)$ выполняется условие:

$$E_n = \frac{|x_i - x_{ref}|}{2\sqrt{\tilde{u}^2(x_i) - \tilde{u}^2(x_{ref})}} < 1, \quad (7)$$

то минимальная стандартная неопределенность, которая может быть заявлена в качестве СМС составляет [10]:

$$u_i(cmc) = \tilde{u}(x_i). \quad (8)$$

Соответственно расширенная неопределенность составляет $U_{0,95,i}(cmc) = 2\tilde{u}(x_i)$.

Если для результата измерения $x_i, \tilde{u}(x_i)$ не выполняется условие (7) (При применении метода MSC, основанного на формировании попарно согласованного множества, условие (7) выполняется автоматически), то соответствующая

неопределенность не подтверждается в ходе данных дополнительных сличений. Далее для этого участника сличений возможны следующие действия:

участнику для подтверждения неопределенности необходимо участие в других аналогичных дополнительных сличениях.

или минимальная стандартная неопределенность, которая может быть заявлена в качестве СМС вычисляется по формуле (9):

$$u_i^2(cmc) = (x_i - x_{ref})^2 + \tilde{u}^2(x_i) \quad (9)$$

Соответственно расширенная неопределенность составляет $U_{0,95,i}(cmc) = 2u_i(cmc)$.

Общая схема подтверждения СМС по результатам дополнительных сличений

Подтверждение СМС по результатам дополнительных сличений основывается на статистических методах оценивания данных и критериях проверки гипотез. При выборе метода оценивания данных проверяется согласованность представленных результатов. В данном документе под согласованным множеством результатов понимается множество, для элементов которого выполняется критерий χ^2 . Для подтверждения СМС данных необходимо выполнение критерия E_n для соответствующего результата.

Схема ниже описывает последовательность применяемых алгоритмов обработки и проверок критериев χ^2 и E_n для подтверждения СМС строк.

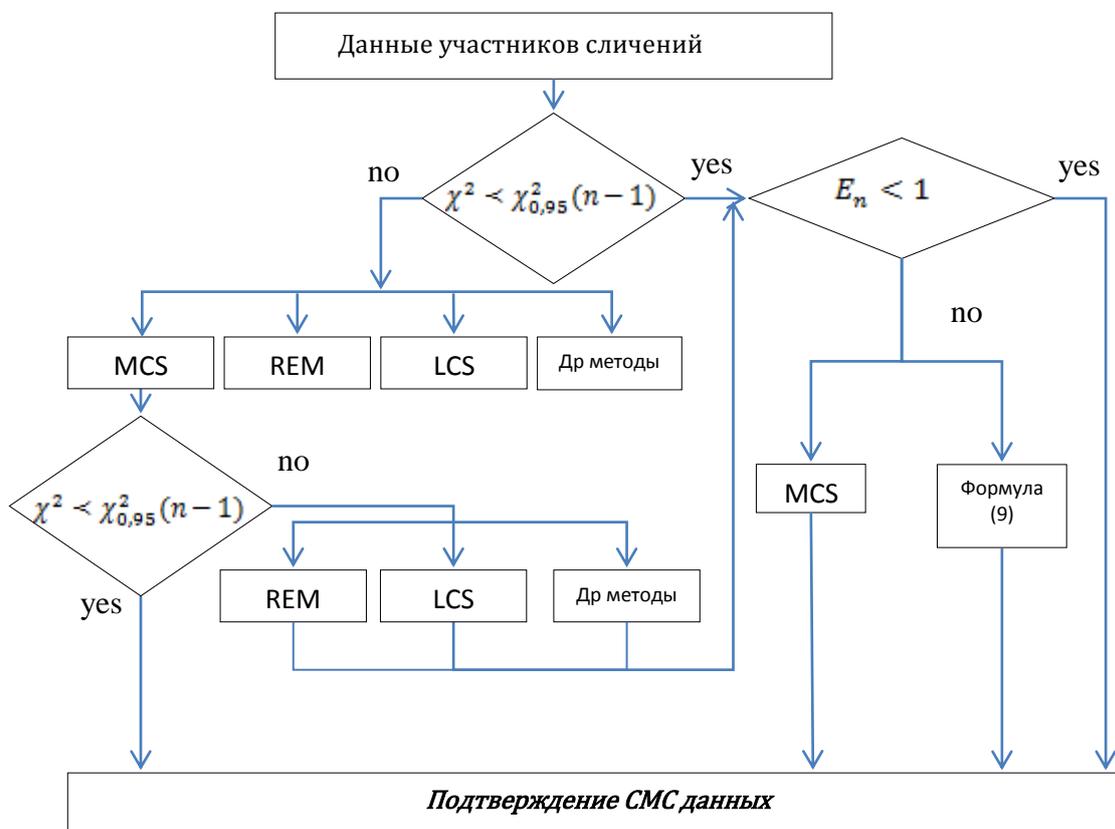


Рис.1. Схема подтверждения СМС по результатам дополнительных сличений.

Подтверждение СМС данных. II тип

Референтная лаборатория устанавливает на основе результатов измерений или расчетов опорное значение дополнительных сличений – оценку значения транспортируемого эталона сравнения и соответствующую неопределенность:

$$x_{ref}, u(x_{ref})$$

Подтверждение СМС основано на использовании критерия \tilde{E}_n (10), вычисленном по представленному НМИ результату измерения, $x_i, u(x_i)$:

$$\tilde{E}_n = \frac{|x_i - x_{ref}|}{2\sqrt{u^2(x_i) + u^2(x_{ref}) - 2\text{cov}(x_i, x_{ref})}} < 1 \quad (10)$$

Примечание. Основной причиной ковариации $\text{cov}(x_i, x_{ref})$ является заимствование единицы величины у референтной лаборатории. Для вычисления ковариации необходимо проанализировать бюджет участника сличений и референтной лаборатории и выявить те составляющие, которые являются общими и неизменными $u_0^2(x_i)$:

$$\text{cov}(x_i, x_{ref}) = u_0^2(x_i) \quad (11)$$

Если условие (10) выполняется, то минимальная стандартная неопределенность, которая может быть заявлена в качестве СМС равна $u_i(\text{смс}) = u(x_i)$. Соответственно расширенная неопределенность составляет $U_{0,95,i}(\text{смс}) = 2u_i(\text{смс})$.

Результаты НМИ, которые не удовлетворяют неравенству (10), не подтверждают заявленные неопределенности. Эти НМИ должны провести анализ причин выпадения своих результатов. В результате анализа может быть установлено:

- результат измерения является промахом, и НМИ принимает решение об исключении своего результата. В этом случае заявленные неопределенности не подтверждаются в ходе данных дополнительных сличений, и для их подтверждения необходимо участие в других аналогичных дополнительных сличениях;

- НМИ выявляет причины занижения заявленной оценки неопределенности и предоставляет эти причины пилот-лаборатории и другим участникам сличений. Участники сличений соглашаются с представленными объяснениями, после чего первоначально заявленная неопределенность увеличивается. Минимальная стандартная неопределенность, которая может быть заявлена в качестве СМС [10] вычисляется по формуле (12):

$$u_i^2(\text{смс}) = (x_i - x_{ref})^2 + u^2(x_i) \quad (12)$$

Соответственно расширенная неопределенность составляет $U_{0,95,i}(\text{смс}) = 2u_i(\text{смс})$.

Случай двусторонних сличений

Выделение случая двусторонних сличений во многом связано с обсуждением гибридных сличений, которые были предложены АРМР, как основа для подтверждения СМС [12].

В случае двусторонних сличений I типа вычисление опорного значения не требуется. Для подтверждения согласованности результатов измерения $x_1, u(x_1)$ и $x_2, u(x_2)$, должно выполняться условие попарной согласованности результатов (критерий E_n):

$$E_n = \frac{|x_1 - x_2|}{2\sqrt{u^2(x_1) + u^2(x_2)}} < 1 \quad (13)$$

Если для результатов измерения $x_1, u(x_1)$ и $x_2, u(x_2)$ выполняется условие (13), то минимальная стандартная неопределенность, которая может быть заявлена в качестве СМС составляет:

$$u_i(\text{смс}) = u(x_i). \quad (14)$$

Соответственно расширенная неопределенность составляет $U_{0,95,i}(\text{смс}) = 2u_i(\text{смс})$.

Если для результатов измерения $x_1, u(x_1)$ и $x_2, u(x_2)$ не выполняется условие (13), то участникам сличения следует проанализировать свои данные с целью исключения ошибок и выявления причин занижения заявленной неопределенности. Процедура увеличения первоначально заявленных неопределенностей для двух участников не предусмотрена.

В случае двусторонних сличений II типа одна лаборатория - референтная устанавливает на основе результатов измерений или расчетов опорное значение дополнительных сличений - оценку значения транспортируемого эталона сравнения и соответствующую неопределенность: $x_{ref}, u(x_{ref})$

Если единица величины заимствована у референтной лаборатории, то

$$\text{cov}(x_i, x_{ref}) = u^2(x_{ref})$$

Если нет, то

$$\text{cov}(x_i, x_{ref}) = 0$$

Все остальные вычисления аналогичны случаю, когда участников сличений больше двух

Заключение

Ключевые и дополнительные сличения национальных эталонов лежат в основе подтверждения СМС национальных метрологических институтов. Алгоритмы оценивания данных сличений достаточно сложно формализовать, поскольку в каждой области измерений существуют свои сложившиеся подходы и методы оценивания данных сличений. С другой стороны, естественно стремление к установлению единых для всех правил оценивания результатов сличений. С этой целью в КОOMET разработаны рекомендации по оцениванию данных ключевых COOMET R/GM/14:2016 и дополнительных сличений COOMET R/GM/19:2016. Следует отметить, что эти рекомендации достаточно широко используются и результаты их апробации позволяют своевременно актуализировать данные документы. В данной статье изложены основные изменения, которые внесены в проект актуализированного COOMET R/GM/19:2016, в настоящее время находящегося на обсуждении. Изменения в основном коснулись следующих моментов. (1) Изложена общая

схема оценивания данных и подтверждения СМС, которая объединяет оценивание согласованных и несогласованных данных. (2) Выделен в отдельный раздел случай двухсторонних сличений, который

достаточно активно использует институтами КОOMET для подтверждения строк СМС.

Abstract

Recommendations COOMET R/GM/19:2016 "Guideline on COOMET supplementary comparison evaluation" are used in the processing of COOMET comparison data. Their approbation has shown that this Recommendation is often used when evaluating bilateral comparisons, therefore the case of processing the data of bilateral comparisons was presented in separate sections during the current update of this recommendation within the framework of the topic COOMET 302/RU/04. Now the recommendation is under discussion and improvement within TCs of COOMET.

Usually supplementary comparisons of national standards are carried out in order to confirm the measurement and calibration capabilities (CMC) of the relevant national metrology institutes (NMI).

When evaluating the data of supplementary comparisons, the measurement uncertainties declared by the participants in the comparisons are confirmed, that, in fact, means a confirmation of the corresponding calibration/measurement capabilities. Measurement/calibration capabilities are reported as expanded uncertainties for a coverage probability of 0.95 and cannot be less than the measurement uncertainties reported by the participants in the comparisons.

In this paper, we propose a general SMS confirmation scheme, which describes the sequence of the applied processing algorithms and decision-making using the criteria χ^2 and E_n .

Key words: inconsistent data; uncertainty; reference value; degrees of equivalence; COOMET; CMC.

Список литературы:

1. COOMET R/GM/19:2016 "Руководство по оцениванию данных дополнительных сличений КОOMET". http://www.coomet.org/DB/isapi/cmt_docs/2016/5/2LWQGO.pdf
2. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) 1999 Mutual recognition of national standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes BIPM Publication (Sevres:BIPM)
3. Cox M. G. "The evaluation of key comparison data: determining the largest consistent subset", 2007, Metrologia 44, pp. 187-200
4. R. Willink, Statistical determination of a comparison reference value using hidden errors, Metrologia, 2002, 39, 343–354.
5. CCQM 11 18, Use of an 'excess-variance' approach for the estimation of a key comparison reference value, associated standard uncertainty and degrees of equivalence for CCQM key comparison data, <https://www.bipm.org/cc/CCQM/Allowed/17/CCQM11-18.pdf>
6. R. DerSimonian and N. Laird, Meta-analysis in clinical trials, Controlled Clinical Trials, 1986, 7, 177–188.
7. J. Mandel and R. Paule, Interlaboratory evaluation of a material with unequal number of replicates, Anal. Chemistry, 1970, 42, 1194–1197.
8. R. Paule and J. Mandel, Consensus values and weighting Factors, J. Research Natl. Bureau Standards, 1982, 87, 377–385.
9. Burmistrova N.A., Development and study of algorithms for processing inconsistent data in key comparisons of standards, Meas. Tech. 57 (10) (2015) 1103–1112.
10. Burmistrova N, Viktorov I, Chunovkina A, "Comparative analysis of algorithms for processing inconsistent data on the example of comparisons CCQM-K131", 2019 XXIX International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance" (MMA)
11. Pommé S. "Determination of a reference value, associated standard uncertainty and degrees of equivalence for CCRI(II) key comparison data. Report EUR 25355 EN (with errata notice)" [https://www.bipm.org/cc/CCRI\(II\)/Allowed/22/EUR_25355_EN\(with_errata_notice\).pdf](https://www.bipm.org/cc/CCRI(II)/Allowed/22/EUR_25355_EN(with_errata_notice).pdf)
12. Zakharov I., Botsiura O., Zadorozhnaya I. Data processing specific features of supplementary bilateral comparisons // Ukrainian Metrological Journal, 2020, №2, с. 27-32. DOI10.24027/2306-7039.2.2020.208691