



ФГУП «ВНИИМ
им. Д.И.Менделеева»

Оценка метрологических характеристик средств измерений по результатам калибровки

Докладчик:

Павел Мигаль

к.т.н., зам. директора филиала по науке

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОМПЕТЕНТНОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ И КАЛИБРОВОЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ

(ISO/IEC 17025:2017, IDT)



Требования

6.4 Оборудование

6.4.1 Лаборатория должна иметь доступ к оборудованию ..., которое необходимо для надлежащего осуществления лабораторной деятельности и которое может повлиять на ее результаты.

6.4.6 Измерительное оборудование должно быть калибровано, если точность и неопределенность измерений влияют на достоверность представляемых результатов; и/или калибровка оборудования требуется для установления метрологической прослеживаемости представляемых результатов.

В РФ в разных случаях требуются представление показателей точности измерений с помощью СИ, либо в терминах погрешностей, либо в терминах неопределенностей.

В обоих этих случаях при оценке МХ СИ по результатам калибровки возникают 4 однотипные методические задачи:

1. Использование значения смещения, оцененного при калибровке СИ в данной точке диапазона измерений, при оценке МХ СИ.
2. Использование результатов калибровки, полученных в конкретных точках диапазона измерений, при оценке МХ СИ во всем диапазоне измерений.
3. Использование результатов калибровки в задачах оценки соответствия СИ.
4. Необходимость обоснования обязательного установления межкалибровочного интервала при различных оценках МХ СИ по результатам калибровки и в зависимости от области применения результатов измерений получаемых с помощью откалиброванного СИ.

Типичные результаты калибровки

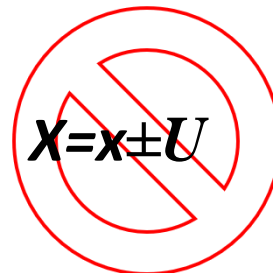
EURAMET cg-15 Guidelines on the Calibration of Digital Multimeters

Applied Voltage		Instrument		Measurement Result	
Value	Frequency	Range	Reading	Error	Uncertainty
100.00 mV	50 Hz	100 mV	99.9 mV	-0.10 mV	0.10 mV
100.00 mV	1 kHz		99.7 mV	-0.30 mV	0.10 mV
1.000 0 V	50 Hz	1 V	0.998 V	-2.0 mV	1.0 mV
1.000 0 V	1 kHz		0.999 V	-1.0 mV	1.0 mV
2.000 V	1 kHz	10 V	2.02 V	20 mV	5 mV
10.000 V	50 Hz		10.03 V	30 mV	10 mV
10.000 V	1 kHz		10.01 V	10 mV	10 mV
10.000 V	20 kHz		9.91 V	-90 mV	10 mV
10.000 V	100 kHz		9.81 V	-190 mV	20 mV
15.000 V	1 kHz		14.98 V	-20 mV	13 mV
100.00 V	50 Hz	100 V	99.8 V	-0.20 V	0.10 V
100.00 V	1 kHz		99.5 V	-0.50 V	0.10 V
1 000.0 V	50 Hz	1000 V	995 V	-5.0 V	1.0 V
1 000.0 V	1 kHz		992 V	-8.0 V	1.0 V

$$\Delta = x - A$$

$$X = x + \Delta$$

$$X = (x + \Delta) \pm U$$



МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ, МЕТРОЛОГИИ И СЕРТИФИКАЦИИ
(МГС)
INTERSTATE COUNCIL FOR STANDARDIZATION, METROLOGY AND CERTIFICATION
(ISC)

МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ
СТАНДАРТ

ГОСТ
34100.3—
2017/
ISO/IEC Guide
98-3:2008

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 3

Руководство по выражению
неопределенности измерения

(ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT)

Руководство рекомендует для известных значимых систематических эффектов применять поправки к результатам измерений

X Неисправленный результат измерения (uncorrected result): Результат измерения до введения поправки на систематическую погрешность

X=x+Δ Исправленный результат измерения (corrected result): Результат измерения после введения поправки на систематическую погрешность

Описание задачи

Объект калибровки является измерительным преобразователем (измерительным прибором) с некоторым диапазоном измерений. Эталон является мерой (многозначной или однозначной), измерительным преобразователем или стандартным образцом (набором стандартных образцов). Калибровка проводится в J ($j=1..J$) точках путем прямых измерений значения величины воспроизводимой эталоном в j -й точке n раз ($i=1..n$). Модель калибровки может быть представлена уравнением (1)

$$\Delta_j = X_j - A_j + \sum_{l=1}^L \varepsilon_{lj}, \quad (1)$$

или уравнением (2)

$$X_j = A_j + \Delta_j + \sum_{l=1}^L \varepsilon_{lj}, \quad (2)$$

где Δ_j – ошибка (погрешность) показаний объекта калибровки;

X_j – результат измерения величины, воспроизводимой эталоном в j -ой точке с помощью объекта калибровки;

A_j – значение величины, воспроизводимой эталоном в j -й точке;

ε_{lj} – поправка связанная с l -м источником неопределенности в j -й точке.

Типичные источники неопределенности

Источник неопределенности	ε_l	Оценка неопределенности
Повторяемость измерений	s	$u_{A_j}^2 = \frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (\Delta_{ij} - \Delta_j)^2$ (3)
Калибровка эталона	U(A)	сертификат калибровки;
Погрешность показаний эталона	$\Delta(A)$	PMГ 115 п. 6.1
Нестабильность эталона*	s(A)	см. OIML D10, PMГ 115 п. 6.2
Цена деления, дискретность показаний или разрешающая способность объекта калибровки	d	$d/(2 \cdot \sqrt{3})$
Нелинейность показаний объекта калибровки	r	PMГ 115 п. 6.3

* для эталонов в виде сертифицированных стандартных образцов неопределенность от нестабильности уже включена в неопределенность аттестованного значения [1]

Тогда расширенная неопределенность оценивается по формуле

$$U_j = k \cdot u_{c_j} = k \cdot \sqrt{u_{A_j}^2 + \sum_{l=1}^L (c_{lj} \cdot u_{lj})^2}, \quad (4)$$

где k – коэффициент охвата ($k=2$; $p \approx 0,95$);
 u_{c_j} – суммарная стандартная неопределенность в j -й точке;
 c_{lj} – коэффициент влияния l -го источника неопределенности в j -й точке;
 u_{lj} – величина стандартной неопределенности l -го источника неопределенности в j -й точке.

Способы учета погрешности показаний

Когда Δ становится еще одним источником неопределенности, получаемое значение неопределенности можно интерпретировать как неопределенность показаний измерительного прибора в точке j : $X_j \pm U'_j$. В статье [2], а так же в [3-6] описан способ регламентированный в ISO Guide 33 когда «для грубой аппроксимации квадрат смещения добавляют в бюджет неопределенности для учета нескорректированного, значительного смещения», т.е.

$$U'_j = k \cdot \sqrt{u_{cj}^2 + \Delta_j^2}. \quad (5)$$

Авторы [2] описали еще ряд способов учета наблюдаемого смещения. Например

$$U'_j = \sqrt{(k \cdot u_{cj})^2 + \Delta_j^2} = \sqrt{U_j^2 + \Delta_j^2}, \quad (6)$$

или расширенную неопределенность U заменяют на $U + \Delta$, как описано в примере F.2.4.5 ГОСТ 34100.3

$$U'_j = k \cdot u_{cj} + |\Delta_j| = U_j + |\Delta_j|. \quad (7)$$

Учет неопределенности от нелинейности

Применительно к поставленной задаче – описать неопределенность показаний в некотором диапазоне измерений, недостаточно знаний о неопределенности, оцененной в отдельных точках диапазона. Тогда необходимо оценить диапазон калибровки и нелинейность статической характеристики объекта калибровки в этом диапазоне, которая выражается в наличии отклонений этой характеристики от аппроксимирующей линии [7], т.к. результатом калибровки является $X \pm U$ для любого показания объекта калибровки X в установленном диапазоне $X_{min} \dots X_{max}$.

В статье [8] п. 2.2 описан подход к оценке неопределенности от нелинейности на основе предельного отклонения от функции преобразования в предположении равномерного распределения. Этот подход можно описать формулой

$$U' = k \cdot \sqrt{\frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J u_{c j}^2 + \left(\frac{\max_{1 \leq j \leq J} |\Delta_j|}{\sqrt{3}} \right)^2}, \quad (8)$$

где $\max |\Delta_j|$ – является границей предела погрешности от нелинейности.

Однако это применимо, когда зависимость $\Delta = f(X_j)$ действительно является нелинейной и/или Δ носит систематический характер. Кроме того, не учитывается дисперсия величин u_c и Δ по диапазону измерений.

Учет неопределенности от нелинейности

В примере F.2.4.5 ГОСТ 34100.3 приведен способ, когда результат измерений получают путем корректировки показания измерительного прибора на величину среднего значения поправок, полученных при калибровке, а в неопределенность добавляют дисперсию этой средней поправки. В предположении равномерного закона распределения величины Δ интегральную форму записей легко привести к дискретной и вычислить среднее значение поправки, ее дисперсию и среднее значение суммарной стандартной неопределенности по формулам:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J \Delta_j, \quad (9)$$

$$u_{\Delta}^2 = \frac{1}{J-1} \cdot \sum_{j=1}^J (\Delta_j - \bar{\Delta})^2, \quad (10)$$

$$\bar{u}_c^2 = \frac{1}{J} \cdot \sum_{j=1}^J u_{c j}^2. \quad (11)$$

Однако если все же внесение поправки (пусть даже единой для всего диапазона) не является целесообразным, предлагается прибегнуть к «грубой аппроксимации» и воспользоваться формулами (9) или (11). Тогда

$$U' = k \cdot \sqrt{\bar{u}_c^2 + u_{\Delta}^2 + \bar{\Delta}^2} \quad \text{при } k = 2 \text{ и } \Delta/u_c < 4/3, \quad (12)$$

$$U' = k \cdot \sqrt{\bar{u}_c^2 + u_{\Delta}^2} + |\bar{\Delta}| \quad \text{при } k = 2 \text{ и } \Delta/u_c > 4/3. \quad (13)$$

Оценка неопределенности в диапазоне калибровки

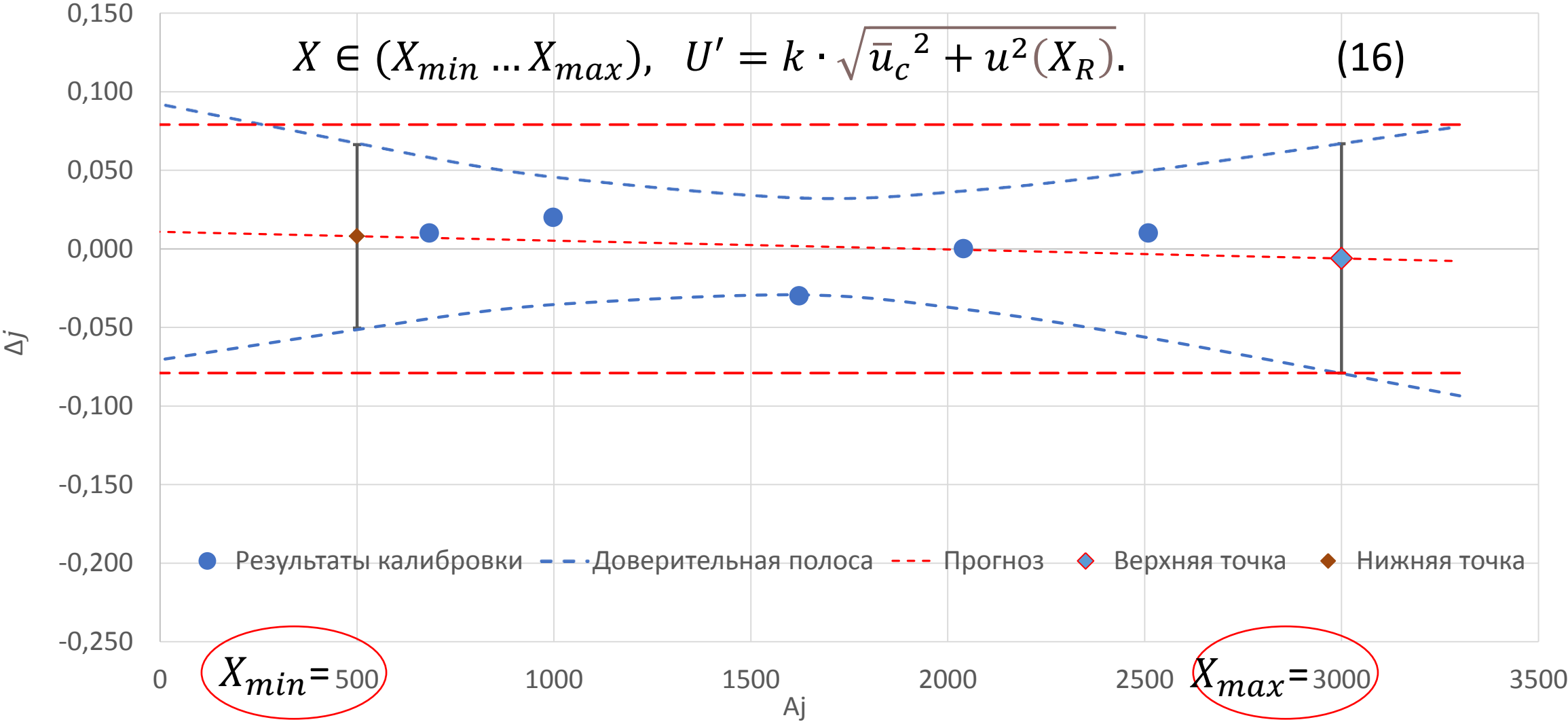
Более подробно можно описать неопределенность от нелинейности на основе регрессионного анализа наблюдаемых смещений по диапазону показаний измерительного прибора. В первом приближении для аппроксимации точностных характеристик на диапазон измерений необходимо оценить зависимость величины Δ_j от точки диапазона. В предположении линейной зависимости $\Delta(X) = \Delta_0 + a \cdot X$, вычисляют коэффициенты регрессии МНК, а характеристики точности аппроксимации вычисляют по формулам:

$$s(\hat{\Delta}(X)) = \sqrt{\frac{1}{J-2} \cdot \sum_{j=1}^J (\Delta_j - \hat{\Delta}_j)^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{J} + \frac{(X-\bar{X})^2}{\sum_{j=1}^J (X_j - \bar{X})^2}}. \quad (14)$$

Тогда, в предположении равномерного распределения величины связанной с угловым коэффициентом регрессии, становится возможным вычислить стандартную неопределенность для начальной (X_{min}) и конечной (X_{max}) точек диапазона по формуле

$$u^2(X_R) = \max \left(\left(\frac{|\hat{a}| \cdot X_{min} + |\hat{\Delta}_0|}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 + S^2(\hat{\Delta}(X_{min})) \right), \left(\frac{|\hat{a}| \cdot X_{max} + |\hat{\Delta}_0|}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 + S^2(\hat{\Delta}(X_{max})) \right). \quad (15)$$

Графическое представление



Комбинированная форма представления неопределенности

При значимости углового коэффициента регрессии $\Delta(X) = \Delta_0 + a \cdot X$, адекватной оценкой расширенной неопределенности будет

$$U' = k \cdot \sqrt{\bar{u}_c^2 + S^2 \left(\hat{\Delta}(X_R) \right) + \left(\frac{\Delta_0}{\sqrt{3}} \right)^2} + |\hat{a}| \cdot X, \quad (17)$$

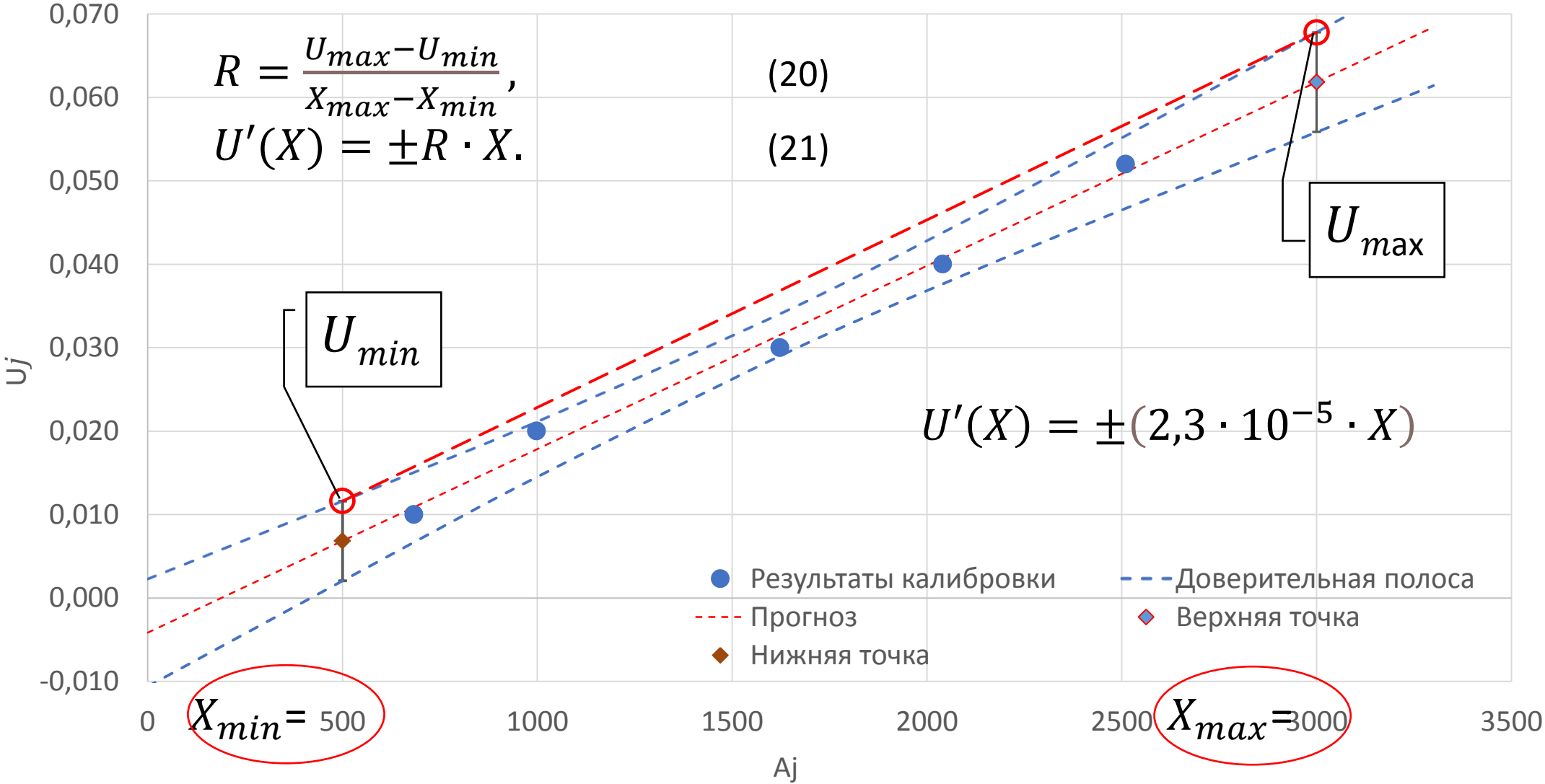
что соответствует комбинированию постоянной и относительной частей неопределенности (например, запись вида $U(X) = \pm(0.1 + 0.01 \cdot X)$).

В случаях, когда составляющие u_{c_j} , так же зависят от точки диапазона измерений целесообразно их так же помещать в относительную часть расширенной неопределенности. Для этого строят зависимость $U'(X) = U_0 + a \cdot X$, находят коэффициенты линейного уравнения и его доверительный интервал по аналогии с описанным выше для $\Delta=f(X)$. Тогда минимальное и максимальное значения расширенной неопределенности можно вычислить по формулам:

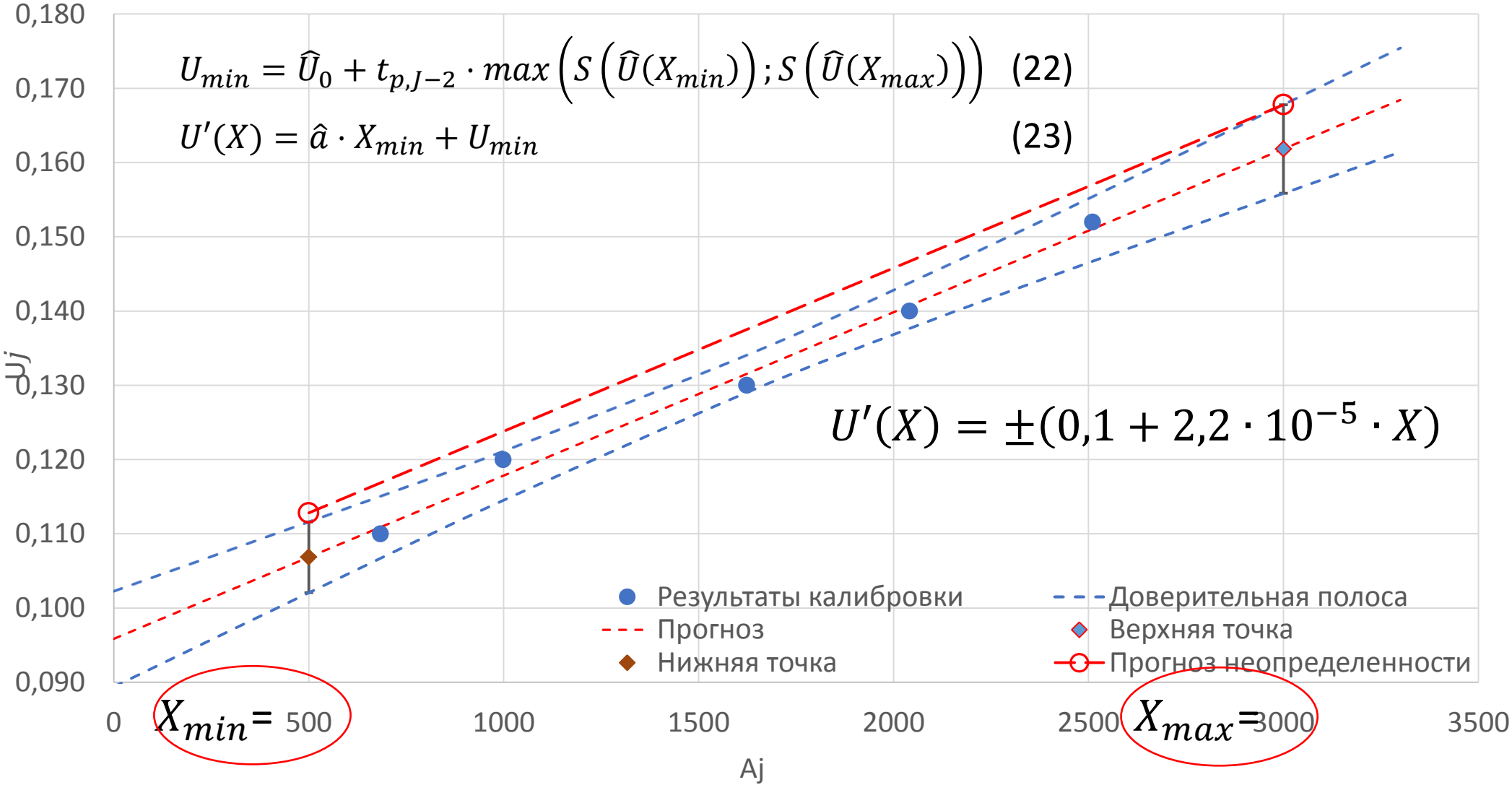
$$U_{min} = \max \left[0; |\hat{a} \cdot X_{min}| + \hat{U}_0 + t_{p,J-2} \cdot S \left(\hat{U}(X_{min}) \right) \right], \quad (18)$$

$$U_{max} = |\hat{a} \cdot X_{max}| + \hat{U}_0 + t_{p,J-2} \cdot S \left(\hat{U}(X_{max}) \right). \quad (19)$$

Графическое представление



Графическое представление



Примеры

Рассмотрим пример калибровки анализатора пористости и проницаемости в диапазонах измерений открытой пористости (0-55) % и коэффициента абсолютной газопроницаемости (0,5-2000) мД. Калибровка проведена с помощью стандартных образцов по модели, представленной уравнением (2).

№	Результаты калибровки, мД (10^{-3} мкм ²)					
X_j	0,69652	1,4252	95,956	146,006	1215,8	1990,8
A_j	0,683	1,498	98,1	149,7	1224	2006
Δ_j	0,013	-0,07	-2,2	-3,6	-8,2	-15
Δ_j/A_j	0,019	-0,049	-0,022	-0,024	-0,007	-0,008
u_{A_j}	0,0005	0,0070	0,51	0,75	7,1	26
u_{B_j}	0,010	0,022	1,5	2,2	18	30
u_{C_j}	0,010	0,024	1,6	2,4	20	40
u_{C_j}/A_j	0,015	0,016	0,016	0,016	0,016	0,020
U_j	0,021	0,047	3,1	4,7	39	79

Ввиду того что величины Δ_j и u_{C_j} прямо пропорционально зависят от A_j , оценку расширенной неопределенности в указанном выше диапазоне проводили в относительном к A_j виде. Полученные значения относительной расширенной неопределенности ($k=2$, $p \approx 0,95$) измерений коэффициента абсолютной газопроницаемости (0,5-2000) мД:

формула (12) 6,4 %; формула (8) 6,5 %

формула (13) 7,1 %; формулы(16, 21) 5,8 %

Примеры

Результаты калибровки открытой пористости

№	Результаты калибровки, %					
X_j	0,026	5,475	10,057	20,435	30,415	50,736
A_j	0,00	5,35	10,15	20,44	30,42	50,70
Δ_j	0,03	0,12	-0,09	-0,01	-0,01	0,04
u_{Aj}	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
u_{Bj}	0,000	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
u_{cj}	0,014	0,026	0,029	0,030	0,032	0,044
U_j	0,028	0,051	0,058	0,060	0,064	0,087

Полученные значения относительной расширенной неопределенности ($k=2$, $p \approx 0,95$) в диапазоне измерений открытой пористости (0-55) %

формула (12) 0,16 %; формула (8) 0,16 %

формула (13) 0,17 %; формулы (16, 21) 0,18 %

формула (23) $(0,05 + 0,001 \cdot X) \%$

Спасибо за внимание!



1. Мигаль П.В., Собина Е.П., Аронов П.М., Кремлева О.Н., Студенок В.В., Фирсанов В.А., Медведевских С.В. Об оценке стабильности стандартных образцов // Эталоны. Стандартные образцы, Т. 19, № 3, 2023. С. 65-75. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-3-65-75>
2. Phillips S.D., Eberhardt K.R., and Parry B. Guidelines for Expressing the Uncertainty of Measurement Results Containing Uncorrected Bias // J Res Natl Inst Stand Technol, Vol. 102, No. 5, 1997. pp. 577-585. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.102.039>
3. Synek. Attempts to include uncorrected bias in the measurement uncertainty // Talanta, Vol. 65, No. 4, 2005. pp. 289-837. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2004.07.038>
4. Haesselbarth W. Accounting for bias in measurement uncertainty estimation // Accreditation and Quality Assurance, Vol. 9, No. 8, 2004. pp. 509-514. <http://dx.doi.org/10.1007/s00769-004-0782-5>
5. Synek. How to encompass an uncorrected bias into the expanded uncertainty with a fixed coverage probability: calculation procedures // Accreditation and Quality Assurance, Vol. 22, No. 4, 2017. pp. 179-186. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00769-017-1268-6>
6. Lira I.H., Woger W. Evaluation of the uncertainty associated with a measurement result not corrected for systematic effects // Meas. Sci. Technol., Vol. 9, No. 6, 1998. pp. 1010-1011. <https://www.doi.org/10.1088/0957-0233/9/6/019>
7. Щепетов А.Г. Основы проектирования приборов и систем : учебник и практикум для вузов. Москва: Юрайт, 2023. 458 с.
8. Kessel, R., Kacker, R., Sommer, K. Uncertainty budgeting for range calibration // Measurement, Vol. 45, No. 6, 2012. pp. 1661-1669. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.12.001>
9. Лукашов Ю.Е. Сравнение процедур поверки и калибровки // Главный метролог, № 6, 2017.
10. Сулаберидзе В.Ш., Чуновкина А.Г. Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сборник докладов научной сессии ГУАП // О применении терминов "калибровка" и "поверка" средств измерений в отечественных нормативных документах. Санкт-Петербург. 2018. С. 234-237.
11. Van der Veen A.M.H., Cox M.G. Compendium of examples: good practice in evaluating measurement uncertainty (Version 2). 2nd ed. EURAMET, 2021. 642 pp. <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.5142180>
12. Kessel, R., Kacker, R., Sommer, K. Uncertainty budgeting for range calibration // Measurement, Vol. 45, No. 6, 2012. pp. 1661-1669. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.12.001>
13. Чуновкина А.Г., Холодова Р.С. Метрологическое обеспечение инновационных технологий : Международный форум // Применение результатов калибровки при оценке точности измерений. Санкт-Петербург. 2020. С. 102-103.
14. White D.R., Clarkson M.T., Saunders P., and Yoon H.W. A general technique for calibrating indicating instruments // Metrologia, Vol. 199, No. 45, 2008. pp. 199-210. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/2/009>