

КАЛИБРОВКА КОНЦЕВОЙ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНОЙ МЕРЫ ДЛИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПАРАТОРА

Б.Қ. Ермек^{1*}, Р.С. Беккожин²

^{1,2} РГП «Казахстанский институт стандартизации и метрологии», Алматы, Казахстан

Аннотация

В статье рассмотрена методика калибровки концевой плоскопараллельной меры длины с использованием компаратора. Актуальность работы обусловлена тем, что меры среднего диапазона широко применяются при поверке и калибровке средств измерений длины, поэтому их действительные значения должны быть прослеживаемыми и обеспечиваться оцененной неопределенностью. Цель исследования – показать возможности компаратора при калибровке меры 40 мм. Описаны конструкция и принцип действия компаратора, условия проведения измерений в лаборатории длины, алгоритм сравнения калибруемой меры с эталонной мерой того же номинала и обработка серий повторных наблюдений. На основе экспериментальных данных рассчитаны действительное значение длины меры, погрешность и неопределенность. Показано, как на результат влияют температурные условия и качество установки меры. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и актуализации методик калибровки концевых мер длины, а также при обосновании измерительных возможностей лабораторий в области линейных измерений.

Ключевые слова: калибровка, измерение, погрешность, концевая мера длины, компаратор.

Введение

Концевые плоскопараллельные меры длины занимают место в системе обеспечения единства измерений линейных размеров. С их помощью реализуется и передается размер от государственных и вторичных эталонов к рабочим средствам измерений – штангенинструменту, микрометрам, индикаторным головкам, координатно-измерительным машинам и различным измерительным приспособлениям. От точности действительных значений концевых мер, в том числе среднего диапазона длин, напрямую зависят результаты контроля геометрических параметров изделий, соответствие продукции требованиям стандартов.

Развитие измерительной техники привело к широкому внедрению высокоточных компараторов длины, позволяющих автоматизировать процесс калибровки и существенно снизить субъективный фактор. Одним из таких средств измерений является компаратор, который обеспечивает высокое разрешение и стабильность результатов при калибровке концевых мер длиной. Вместе с тем в литературе преобладают либо общие описания поверки наборов концевых мер по нормативным

документам, либо краткие сведения о характеристиках компараторов, тогда как практически ориентированные работы, в которых подробно рассматриваются алгоритм калибровки конкретной меры и анализ влияющих факторов для конкретного типа компаратора, встречаются значительно реже.

Исследование, ориентированное на калибровку одной конкретной меры, позволяет детально проследить все этапы измерительного процесса.

Материалы и методы

Исследовательским материалом в работе является концевая плоскопараллельная мера длины номиналом 40 мм, входящая в состав набора концевых мер длины. Концевые меры данного типа предназначены для реализации и передачи единицы длины рабочим средствам измерений, поэтому предъявляются повышенные требования к форме и состоянию их рабочих поверхностей. Исследуемая мера изготовлена из стали, имеет две притертые плоско-параллельные измерительные поверхности и боковые грани, обеспечивающие возможность надежной фиксации в держателе компаратора.

Для уточнения действительного значения длины рабочий эталон, как показано на рисунке 1. меры и оценки ее метрологических характеристик применялся компаратор, рассматриваемый как

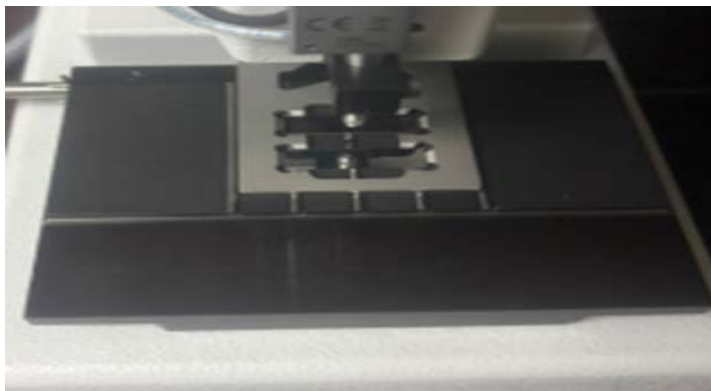


Рисунок 1 – Установка концевой плоскопараллельной меры длины 1 мм на компараторе

Эталонная установка конструктивно включает в себя следующие основные элементы:

- измерительный L-образный штатив с вертикальной зубчатой реечной направляющей и регулируемой вертикальной кареткой, оснащённой верхним датчиком;

- измерительный стальной стол с пятью цилиндрическими штифтами из твёрдосплавного материала, предназначенными для перемещения проверяемых концевых мер длины;

- устройство для точного позиционирования мер при установлении измерительных точек на концевых мерах длины;

- электронный компаратор с линейной шкалой и цифровым отображением результатов;

- два индуктивных датчика-щупа, фиксирующих длину меры при контакте с её поверхностью;

- электромеханическое приспособление для подачи и перемещения мер малого номинального размера (до 10 мм);

- механизм для ручного автоматизированного ориентирования мер;

- теплозащитный экран из акрилового стекла, предохраняющий устройство от теплового воздействия оператора.

До начала эксперимента эталонная и исследуемая меры выдерживались совместно с компаратором в лаборатории длины при температуре $20 \pm 0,5\text{C}$ до установления теплового равновесия. Рабочие поверхности мер и опорная плита тщательно очищались от загрязнений и следов смазочных.

На этапе первого измерения эталонная концевая мера длины устанавливалась на

опорную базовую поверхность компаратора. Поверяемая и эталонная концевые меры устанавливаются в крепёжный узел последовательно, одна за другой (тандемным способом). Поверхность измерительного стола покрыта износостойкими твердосплавными пластинами с низким коэффициентом трения, что обеспечивает плавную замену концевых мер на фиксированной опорной поверхности. В зоне крепления расположен встроенный центрирующий упор, гарантирующий точное позиционирование каждой устанавливаемой меры. В ходе поверки сначала выполняется измерение в контрольной точке эталонной концевой меры, после чего проводится измерение в пяти заданных точках поверяемой плоскопараллельной меры длины.

Снятие показаний осуществляется двумя индуктивными датчиками типа 1340/826, значения которых автоматически суммируются. Для подъёма датчиков при установке или снятии малогабаритных плоскопараллельных мер применяется пневмоэлектрический механизм, к которому подключено вакуумное устройство для безопасного подъёма мер.

Обработка и визуализация результатов выполняются в компактном измерительном модуле Millimar 1240. При необходимости данные могут быть переданы на стационарный или портативный компьютер через стандартный последовательный интерфейс.

Программное обеспечение QMSoft/QM-Block предназначено для измерения как отдельных концевых мер, так и полного комплекта или нескольких идентичных наборов.

После каждого измерения определяются следующие результаты:

- отклонение математического ожидания f_m от номинального значения;
- верхнее и нижнее отклонение f_{lo} и f_{hi} от среднего значения;
- максимальное отклонение f_{lo} от номинального размера для любых точек с

указанием допускаемых значений f_n .

После завершения процесса измерений проводится оценка неопределенности [1]. На этом этапе анализируются все факторы, которые могли повлиять на полученный результат. Для количественной оценки влияния различных факторов на результат калибровки необходимо построить математическую модель измерений по формуле 1.

$$l_x = l_s + \delta l + \delta l_D + \delta l_C + \delta \alpha \cdot \delta t \cdot L + \delta l_v \quad (1)$$

Таблица 1- Входные величины и поправки, применяемые при вычислении длины концевой меры

l_s	длина эталонной концевой меры при температуре $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (в соответствии с приложением к сертификату о калибровке)	действительная длина эталонной концевой меры составляет 1,00009 мм. Неопределенность измерений $U=0,05 \text{ мкм} + 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot l = 0,0500005 \text{ мкм}$, где l – номинальная длина концевой меры в мм, при $k=2, p=0,95$.
δl	разность длин калибруемой и эталонной концевых мер	по протоколу отклонение калибруемой концевой меры от номинального значения составляет: -0,04 мкм
δl_D	изменение длины эталонной концевой меры со времени ее последней поверки вследствие дрейфа	согласно ГОСТ 9038 для меры 1 кл.т. допускаемое изменение для меры в течении 1 года составляет $(0,02+0,0005 \cdot l) \text{ мкм} = 0,0205 \text{ мкм}$, где l – номинальная длина в мм
δl_C	поправка на несовпадение осей компаратора	согласно требований EURAMETcg-2 поправка находится в пределах $\pm 33 \text{ нм}$
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	разница между значениями коэффициентов температурного линейного расширения эталонной и калибруемой концевых мер	согласно требований EURAMETcg -2 стандартная неопределенность от разницы между значениями температур и коэффициентов температурного линейного расширения эталонной и калибруемой концевых мер равна $u_B(\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}) = 0,236 \cdot 10^{-6}$
$\delta t = (t - t_0)$	разница между значениями температуры рабочего пространства t , в котором проводят калибровку, и установленной нормальной температуры $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	остаточная разница температур между эталонной и калибруемой концевыми мерами должна быть в пределах $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$
L	номинальная длина концевой меры	составляет 1 мм
δl_v	поправка из-за контакта не в центре измерительных поверхностей концевой меры	оценивается в пределах $\pm 6,7 \text{ нм}$

Входные величины рассматриваются как некоррелированные, то есть предполагается отсутствие статистической зависимости между отдельными составляющими погрешности и поправками, входящими в модель измерения [2-5].

После определения всех входных величин и соответствующих поправок формируется бюджет неопределенности. В рамках бюджета каждая

составляющая погрешности приводится к стандартной неопределенности, после чего оценивается её вклад в итоговую неопределенность результата калибровки [6-10]. Далее производится объединение стандартных неопределенностей, принимая входные величины некоррелированными, и рассчитывается расширенная неопределенность измерений.

Таблица 2- Бюджет неопределенности

Входящие величины	Оценка входящей величины	Оценка отклонений	Тип неопределенности	Вид неопределенности	Стандартная неопределенность	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность
X_i	x_i	+/-	A/B		u_i	c_i	$u_i c_i$
l_s	1,00009 мм	0,05 мкм	A	нормальное	25,0 нм	1	25,0 нм
δl	-0,00013 мм	-	-	-	-	-	-
δl_D	-	0,0205 мкм	B	треугольное	8,4 нм	1	8,4 нм
δl_C	-	± 33 нм	B	прямоугольное	19,1 нм	1	19,1 нм
δt	-	$\pm 0,05$ °C	B	прямоугольное	0,0289 °C	-11,5 нм·°C ⁻¹	-0,332 нм
$\delta \alpha \cdot \Delta \bar{t}$	-	$0,236 \cdot 10^{-6}$	B	специальное	$0,236 \cdot 10^{-6}$	1	0,236 нм
L	-	-	-	-	-	-	-
δl_V	-	$\pm 6,7$ нм	B	прямоугольное	3,87 нм	1	3,87 нм
l_x	0,99996 мм						$u_c = 32,76$ нм

После составления бюджета неопределенности рассчитывается расширенная неопределенность U результата измерения при установленной доверительной вероятности $p=0,95$, $k=2$ по формуле [11]:

$$U = u_c \cdot k = 32,76 \cdot 2 = 65,52 \text{ нм} \approx 66 \text{ нм} \quad (3)$$

Результат измерений составляет $(0,99996 \text{ мм} \pm 0,07 \text{ мкм})$, при установленной доверительной вероятности $p=0,95$, $k=2$.

Результаты и обсуждение

В ходе выполнения калибровки была определена действительная длина калибруемой концевой меры номиналом 1 мм. На основе сравнения с эталонной мерой, поверки оборудования и анализа условий проведения измерений получено значение длины 0,99996 мм.

Сопутствующие влияющие факторы были учтены путем построения математической модели измерений. Для каждой составляющей была определена стандартная неопределенность, что позволило сформировать полный бюджет неопределенности.

Суммарная неопределенность составила 32,76 нм, что при коэффициенте охвата $k = 2$ соответствует расширенной неопределенности 66 нм (0,07 мкм) при доверительной вероятности 0,95. Полученный интервал охвата отражает область, внутри которой с заданной степенью уверенности находится истинное значение длины меры.

Анализ результатов показывает, что отклонение калибруемой меры от номинального значения является стабильным и лежит в пределах допуска, установленных для мер данного класса точности. Вклад отдельных составляющих

показывает, что основное влияние на итоговую неопределенность оказывают характеристики эталонной меры и неидеальное совпадение осей компаратора, тогда как температурные влияния и смещение точки контакта имеют значительно меньший вклад.

Заключение

В ходе проведенного исследования была выполнена калибровка концевой меры длины номиналом 1 мм с последующей оценкой измеренной длины и ее неопределенности. Целью работы являлось получение достоверного результата измерений на основе сравнения с эталонной мерой, построения математической модели и анализа всех влияющих факторов. В качестве метода исследования использовалась схема одновременного сравнения, модель измерений с учётом поправок, а также методология оценки неопределённости, регламентированная GUM и рекомендациями EURAMET.

Сформулированные выводы подтверждают обоснованность примененного подхода к оценке длины и неопределенности, а также демонстрируют корректность выбранной

математической модели. Полученные результаты свидетельствуют о соответствии калибруемой меры предъявляемым метрологическим требованиям и подтверждают ее пригодность к дальнейшему применению в составе точных измерительных средств.

Литературы

1. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) = Международный словарь по метрологии : осн. и общие понятия и соответствующие термины / Joint Committee for Guides in Metrology. — 3rd ed. — Paris : JCGM, 2008. — 90 p. — Текст : непосредственный.
2. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories = Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий. — Geneva : ISO, 2017. — 30 p. — Текст : непосредственный.
3. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) / Joint Committee for Guides in Metrology. — 3rd ed. — Paris : JCGM, 2012. — 91 p. — Текст : непосредственный.
4. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). — 1st ed. — Geneva : ISO, 1993. — 101 p. — Текст : непосредственный.
5. Willink, R. Measurement Uncertainty and Probability. — Cambridge : Cambridge University Press, 2013. — 276 p. — Текст : непосредственный.
6. EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. — Brussels : European Co-operation for Accreditation, 1999. — 79 p. — Текст : непосредственный.
7. Dieck, R. H. Measurement Uncertainty: Methods and Applications. — 4th ed. — Research Triangle Park : ISA, 2007. — 277 p. — Текст : непосредственный.
8. Measurement uncertainty estimations: GUM method : электронный ресурс. — URL: <https://www.wasyresearch.com/measurement-uncertainty-estimations-gum-method/> (дата обращения: март 2025). — Текст : электронный.
9. ГОСТ ISO 5725-1–2003. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Ч. 1. Общие принципы и определения. — М. : Стандартинформ, 2003. — Текст : непосредственный.
10. OIML G 19:2017. The role of

measurement uncertainty in conformity assessment decisions in legal metrology. — Paris : OIML, 2017. — Текст : непосредственный.

11. Taylor, J. R. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. — 2nd ed. — Sausalito, CA : University Science Books, 1997. — 327 p. — ISBN 0-935702-42-3. — Текст : непосредственный.

References

1. JCGM 200:2008. International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd ed. Paris: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. 90 p.
2. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 30 p.
3. JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology — Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM). 3rd ed. Paris: Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. 91 p.
4. ISO. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). 1st ed. Geneva: International Organization for Standardization, 1993. 101 p.
5. Willink, R. Measurement Uncertainty and Probability. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 276 p.
6. EA-4/02. Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. Brussels: European Co-operation for Accreditation, 1999. 79 p.
7. Dieck, R. H. Measurement Uncertainty: Methods and Applications. 4th ed. Research Triangle Park: ISA, 2007. 277 p.
8. Measurement Uncertainty Estimations: GUM Method [Electronic resource]. Available at: <https://www.wasyresearch.com/measurement-uncertainty-estimations-gum-method/> (accessed March 2025).
9. GOST ISO 5725-1–2003. Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 1. General Principles and Definitions. Moscow: Standartinform, 2003.
10. OIML G 19:2017. The Role of Measurement Uncertainty in Conformity Assessment Decisions in Legal Metrology. Paris: OIML, 2017.
11. Taylor, J. R. An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements. 2nd ed. Sausalito, CA: University Science Books, 1997. ISBN 0-935702-42-3.

ҰЗЫНДЫҚТЫҢ ЖАЗЫҚ-ПАРАЛЛЕЛЬДІ КОНЦЕВОЙ ӨЛШЕМ БІРЛІГІН КОМПАРАТОРДЫ ПАЙДАЛАНЫП КАЛИБРЛЕУ

Б. Ермек^{1*}, Р. Беккожин²

^{1,2}*"Қазақстан стандарттау және метрология институты" РМК, Алматы, Қазақстан*

Андатпа

Мақалада компараторды қолдану арқылы ұзындықтың жазық-параллельді концевой өлшем бірлігін калибрлеу әдістемесі қарастырылған. Жұмыстың өзектілігі орта диапазондағы өлшем бірліктерінің ұзындық өлшеу құралдарын тексеру және калибрлеу кезінде кең қолданылуымен түсіндіріледі, сондықтан олардың нақты мәндері қадағаланатын болуы және бағаланған анық еместікпен қамтамасыз етілуі қажет. Зерттеудің мақсаты – 40 мм өлшем бірлігін калибрлеу кезінде компаратордың мүмкіндіктерін көрсету. Компаратордың құрылысы мен жұмыс істеу принципі, ұзындық зертханасында өлшеу жүргізу шарттары, номиналы бірдей эталондық өлшем бірлікпен салыстыру алгоритмі және бірнеше қайталама бақылауларды өңдеу тәсілі сипатталған. Эксперименттік деректер негізінде өлшем бірлігінің нақты ұзындығы, қателігі және анық еместігі есептелді. Температуралық жағдайлар мен өлшем бірлігін орнату сапасының нәтижеге қалай әсер ететіні көрсетілді. Алынған нәтижелер концевой өлшем бірліктерін калибрлеу әдістемелерін әзірлеу және жаңарту кезінде, сондай-ақ сызықтық өлшемдер саласындағы зертханалардың өлшеу мүмкіндіктерін негіздеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: калибрлеу, өлшеу, қателік, концевой өлшем бірлігі, компаратор.

CALIBRATION OF A FLAT PARALLEL GAUGE BLOCK USING A COMPARATOR

B.K. Yermek^{1,*}, R.S. Bekkozhin²

^{1,2}*RSE "Kazakhstan Institute of Standardization and Metrology", Almaty, Kazakhstan*

Abstract

The article examines the methodology for calibrating a flat parallel gauge block using a comparator. The relevance of the work is due to the widespread use of medium-range gauge blocks in the verification and calibration of length measuring instruments; therefore, their actual values must be traceable and supported by an evaluated measurement uncertainty. The aim of the study is to demonstrate the capabilities of a comparator when calibrating a 40 mm gauge block. The construction and operating principle of the comparator, the measurement conditions in the length laboratory, the algorithm for comparing the calibrated gauge block with a reference block of the same nominal length, and the processing of repeated measurement series are described. Based on the experimental data, the actual length value of the gauge block, its error, and the measurement uncertainty were calculated. The influence of temperature conditions and the quality of gauge block positioning on the final result is shown. The obtained results can be used in the development and revision of calibration procedures for gauge blocks, as well as in the justification of measurement capabilities of laboratories in the field of dimensional metrology.

Key words: calibration, measurement, error, gauge block, comparator.