

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Обзорная статья

УДК 003.295.8:531.717(006.9)

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-91-106>



Штриховые меры длины. Часть I. Обзор современного состояния нормативно-технической базы

К. В. Чекирда¹  , В. В. Милорадов²  

¹ ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия

 K.V.Chekirda@vniim.ru

² ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний
в Свердловской области», г. Екатеринбург, Россия

 geo@uraltest.ru

Аннотация: Видеоизмерительные системы благодаря высокой степени автоматизации характеризуются большой точностью, что позволяет эффективно решать производственные и бизнес-задачи. Для их калибровки и метрологической поверки используются штриховые меры длины как материальные меры, воспроизводящие единицу длины. Штриховые меры длины применяются в качестве рабочих эталонов в различных областях науки и техники. Однако непрерывное развитие нормативной базы и технических стандартов требует своевременной актуализации данных и подходов, используемых в процессе метрологического обеспечения штриховых мер длины.

Цель представленного обзора – оценить текущее состояние нормативной и технической базы, используемой в Российской Федерации для метрологического обеспечения штриховых мер длины, проанализировать применяемые методические подходы для поверки и калибровки штриховых мер длины в соответствии с действующей Государственной поверочной схемой, наметить пути их дальнейшего совершенствования.

На основе анализа содержания законодательных и нормативных актов, обобщения данных научной литературы, а также собственного профессионального опыта авторы выявили факторы, препятствующие развитию системы метрологического обеспечения штриховых мер длины. Во-первых, материально-техническая база в настоящее время характеризуется высоким уровнем износа и требует комплексной модернизации. Внедрение современных технологий, таких как лазерные интерферометры, позволит повысить точность и скорость измерений, что является критически важным для обеспечения требуемой точности измерений и производительности работ.

Во-вторых, установлено, что для автоматизации процесса измерений и снижения влияния человеческого фактора перспективным направлением является применение цифровых методов обработки информации, в частности технологий искусственного интеллекта и машинного зрения (например, ПЗС-камер – камер, оборудованных прибором с зарядовой связью в качестве датчика изображения). Следовательно, передачу единицы длины штриховым мерам длины методом компарирования можно адаптировать к современным реалиям с помощью автоматизированной системы снятия отсчета. Однако для этого необходимо решить проблему отсутствия производства штриховых мер длины размером свыше 1 мм и обновить технический парк существующих рабочих эталонов 1-го, 2-го, 3-го и 4-го разрядов.

Таким образом, представленный в статье анализ актуального состояния сферы метрологического обеспечения штриховых мер длины обосновывает назревшую необходимость разработки и создания современной установки для поверки штриховых мер длины, соответствующей требованиям, предъявляемым к вторичным эталонам единицы длины. Это позволит обеспечить высокую точность и надежность измерений. Опыт использования прецизионных направляющих станет отправной точкой в производстве прогрессивных средств измерений, таких как длинномеры – для проведения измерений внутренних и наружных размеров; компараторы – для поверки штриховых мер длины низших разрядов. Вкупе эти решения способствуют повышению конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке.

Ключевые слова: длина, штриховая мера длины, компаратор длины, интерферометр, перемещение, видеоизмерительная система, цифровой микроскоп

Принятые сокращения: ВИС – видеоизмерительные системы; ГПС – Государственная поверочная схема; ГПЭ – Государственный первичный эталон; МБМВ – Международное Бюро по Мерам и Весам; СИ – средства измерений; ШМД – штриховые меры длины.

Для цитирования: Чекирда К. В., Милорадов В. В. Штриховые меры длины. Часть I. Обзор современного состояния нормативно-технической базы // Эталон. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 3. С. 91–106. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-91-106>

Статья поступила в редакцию 07.07.2025; одобрена после рецензирования 15.08.2025; принята к публикации 25.09.2025.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Review Article

Line Standards of Length. Part I. Review of the Current State of the Regulatory and Technical Framework

Konstantin V. Chekirda¹  , Vladimir V. Miloradov²  

¹ D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 K.V.Chekirda@vniim.ru

² State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, Russia

 geo@uraltest.ru

Abstract: Video measuring systems are characterized by high accuracy due to their high degree of automation, which allows them to effectively solve production and business tasks. For their calibration and metrological verification, line standards of length are used as material measures reproducing a measurement unit of length. Line standards of length are employed as working standards in various fields of science and technology. However, the continuous development of the regulatory framework and technical standards requires timely updating of data and approaches used in the process of metrological support for line standards of length.

The aim of the review is to assess the current state of the regulatory and technical framework used in the Russia for the metrological support of line standards of length. It analyzes the methodological approaches employed for the verification and calibration of line standards of length in accordance with the current State Verification Schedule and outlines potential ways for their further improvement.

Based on the analysis of legislative and regulatory acts, a review of scientific literature, as well as the authors' own professional experience, factors hindering the development of the metrological support system for line standards of length have been identified. Firstly, the regulatory and technical framework is characterized by a high degree of wear and requires comprehensive modernization. The implementation of modern technologies, such as laser interferometers, will enhance the accuracy and speed of measurements, which is critically important for ensuring the required measurement accuracy and work productivity.

Secondly, it has been established that the application of digital information processing methods, in particular artificial intelligence and machine vision technologies (for example, CCD cameras – cameras equipped with a charge-coupled device as an image sensor) is a promising direction for automating the measurement process and reducing the influence of the human factor. Consequently, the transfer of the measurement unit of length from line standards of length using the comparison method can be adapted to modern realities through an automated reading system. However, this requires solving the problem of the lack of production of line standards of length longer than 1 mm and updating the technical inventory of existing working standards of the 1st, 2nd, 3rd, and 4th grades.

Thus, the analysis of the current state of metrological support for line standards of length presented in the article convincingly substantiates the urgent need to develop and create a modern installation for verification of line standards of length that meets the requirements for secondary standards of the measurement unit of length. This will ensure high accuracy and reliability of measurements for precision guidance: length gauges – for measuring internal and external dimensions; comparators – for the verification of lower-grade line standards, and also enhance the competitiveness of domestic products on the international market.

Keywords: length, line standard of length, length comparator, interferometer, displacement, video measuring system, digital microscope

Abbreviators used: VMS – video measuring systems; SVS – State Verification Schedule; SPS – State Primary Standard; BIPM – International Bureau of Weights and Measures; MI – measuring instruments.

For citation: Chekirda K. V., Miloradov V. V. Line standards of length. Part I. Review of the current state of the regulatory and technical framework. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(3):91–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-3-91-106>

The article was submitted 07.07.2025.; approved after reviewing 15.08.2025.; accepted for publication 25.09.2025.

Введение

В Российской Федерации высокотехнологичный сектор промышленности в 20-е годы XXI века характеризуется интенсивным развитием производства¹, которое сопровождается повышением требований к точности измерительных инструментов и методов измерений, сокращению сроков их тестирования для установления и дальнейшего подтверждения метрологических характеристик. ВИС отвечают не только перечисленным выше установкам, но и позволяют

в процессе эксплуатации решить целый комплекс производственных и бизнес-задач, на чем мы остановимся в следующих разделах статьи.

Обзор имеет целью представить информацию о текущем состоянии нормативной и технической базы, используемой в Российской Федерации для метрологического обеспечения ШМД, которые являются основными средствами измерения применяемых при поверке и калибровке ВИС. Также в обзоре представлены аналитические данные, свидетельствующие о необходимости пересмотра и совершенствования методов и подходов при поверке и калибровке ШМД, применяемых в настоящее время в соответствии с действующей ГПС.

¹ Концепция технологического развития на период до 2030 года : Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р.

Представляется актуальным обсуждение накопленного авторами эмпирического материала по данной теме и сформулированных на его основе выводов, переосмысление и поиск новых подходов к их трактовке и использованию.

В обзоре поставлены следующие задачи:

- обзор и классификация ШМД;
- обзор нормативной базы в части метрологического обеспечения ШМД;
- аналитический обзор технических средств передачи единицы длины ШМД в соответствии с требованиями ГПС;
- аналитический обзор существующих методов передачи единицы длины ШМД в Российской Федерации и других странах;
- пути решения сложившихся проблем и способы их решения.

Материал исследования

Для проведения обзора были использованы отечественные научные публикации, представленные в базах данных Google Scholar, eLIBRARY.RU и КиберЛенинка за период с 2010 г. включительно (на 01.01.2025). Поисковые запросы включали комбинации ключевых слов «штриховая мера длины», «видеоизмерительная система», «линейные шкалы», «лазерный интерферометр». Ввиду ограниченного числа доступных публикаций по данной тематике, авторами были дополнительно изучены материалы, относящиеся к периоду 1950-х и 1980-х гг., большое количество документов было получено из архивов ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. В числе авторов рассматриваемых публикаций значатся: Бржезинский М. Л.²,

² Бржезинский М. Л. Компаратор для измерения штриховых мер длины. Авторское свидетельство, заявлено 4 марта 1953 г. за № 47/356/447647 в Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

Бржезинский М. Л. Компаратор с параллельным расположением штриховых мер. Авторское свидетельство, заявлено 28 сентября 1957 г. за № 583774 в Комитет по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР.

Бржезинский М. Л. Интерференционные измерения штриховых эталонов длины // Измерительная техника. 1963. № 2.

Бржезинский М. Л. Интерференционные компараторы для измерения длины штриховых мер. Труды институтов Госкомитета. Исследования в области

Боровков В. А.³, Ежкин В. Е.⁴, Коронкевич В. П.⁵, Феклистов Е. М.⁶, Каяк Л. К.⁷, Зорин Д. И.⁸

Исследование современного измерительного оборудования, используемого в зарубежных научных метрологических институтах, было проведено на основе отчета по сравнению EUROMET.L-K7.2006 – Key Comparison: Calibration of line scales⁹, датированного 2006 г.

Обзор ВИС и ШМД, а также исходных данных для анализа актуальности вопросов метрологического обеспечения ВИС и ШМД,

линейных измерений. Выпуск 78 (138). Москва – Ленинград : Издательство стандартов, 1965 г.

Бржезинский М. Л. Фотометрический фотоэлектрический микроскоп. Труды институтов Госкомитета. Исследования в области линейных измерений. Выпуск 78 (138). Москва – Ленинград : Издательство стандартов, 1965 г.

³ Боровков В. А. Компаратор для аттестации линейных штриховых мер. Авторское свидетельство № 441444. Дата опубликования описания: 20.08.1975. Государственный комитет Совета Министров СССР по делам изобретений и открытий.

⁴ Ежкин В. Е. Устройство для аттестации штриховых мер. Авторское свидетельство № 771463. Дата опубликования описания: 25.10.1980. Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.

Ежкин В. Е. Устройство для аттестации штриховых мер. Авторское свидетельство № 849002. Дата опубликования описания: 23.07.1981. Государственный комитет СССР по делам изобретений и открытий.

⁵ Коронкевич В. П., Трулев Ю. И. Счетчик интерференционных полос для измерения малых длин // Измерительная техника. 1959. № 8.

⁶ Феклистов Е. М. Фотоэлектрические микроскопы // Измерительная техника. 1962. № 12.

⁷ Каяк Л. К., Торопин С. И. Фотоэлектрические микроскопы для компарирования штриховых мер длины // Измерительная техника. 1960. № 2.

Каяк Л. К. Двойной фотоэлектрический микроскоп для компарирования подразделений штриховых мер длины. Труды институтов Госкомитета. Исследования в области линейных измерений. Выпуск 78 (138). Москва – Ленинград : Издательство стандартов, 1965 г.

⁸ Зорин Д. И. Измерение длины штриховых мер счетом интерференционных полос. Труды институтов Госкомитета. Исследования в области линейных измерений. Выпуск 78 (138). Москва – Ленинград : Издательство стандартов, 1965 г.

⁹ EUROMET.L-K7.2006 – Key Comparison: Calibration of line scales / Metrology Institute of the Republic of Slovenia, University of Maribor // Physikalisch-Technische Bundesanstalt Bundesallee : [website]. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/45451722/EUROMET.L-K7.2006.pdf/5e623fe8-9a80-810a-5f4e-d6faff11d4c8> (Accessed 07 July 2025).

строился на информации, представленной в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений в разделах «Сведения об утвержденных типах средств измерений» и «Сведения о результатах поверки средств измерений». Обзор нормативных документов по метрологическому обеспечению ШМД выполнен в профессиональной справочной системе «Техэксперт».

Материалы и методы

Сфера применения ВИС

Оптические ВИС широко используются в приборах и системах для измерения геометрических характеристик объектов, их формы и структуры. Это главным образом связано с достижениями в разработке многоэлементных, высокочувствительных и быстрых матричных фотоприемников, основанных на устройствах с зарядовой связью [1].

Производство микроэлектроники. Микроэлектронная индустрия – наиболее стремительно развивающийся сектор мировой экономики. Продукция микроэлектронной индустрии (микрочипы, полупроводниковые материалы и т. д.) – фундаментальный компонент технологических решений, реализованных в компьютерах, мобильных гаджетах, медицинском оборудовании и далее – в большом перечне приборов. По мере усложнения и миниатюризации микроэлектронных компонентов становятся более точными производственные процессы, предопределяя тем самым высокие требования к организации контроля и измерений для обеспечения высокого качества продукции. В этом контексте ВИС становится инструментом контроля качества продукции, выявления дефектов, обеспечения высокой точности, скорости и надежности процессов производства микроэлектроники [2].

Линейные и угловые измерения. ВИС применяются для линейных и угловых измерений во многих отраслях промышленности, включая приборостроение и машиностроение. Каждый этап жизненного цикла изделия – от проектирования до отправки потребителю – сопровождается контролем, на этапе которого при помощи ВИС производится сравнение и оценка точности изготовления продукции.

Металлография и материаловедение. Разновидностью ВИС являются анализаторы фрагментов микроструктуры твердых тел – СИ утвержденного типа, разработанные для автоматизации процесса микроструктурного анализа (85829-22, 27438-10 – номера в Госреестре СИ¹⁰).

Назначение анализаторов фрагментов микроструктуры твердых тел:

- 1) оценка качества продукции;
- 2) проведение входного контроля материалов на соответствие требованиям российских и международных стандартов, индивидуальным спецификациям предприятия.

Сфера применения анализаторов – измерение параметров микроструктуры твердых тел в угольной, металлургической, химической и других отраслях промышленности.

Преимущества ВИС

Рассмотрим преимущества ВИС в сравнении с традиционными оптическими методами измерений.

Высокая точность и разрешающая способность. ВИС и современные цифровые микроскопы обладают значительно большей разрешающей способностью, позволяя детально фиксировать и измерять объекты в микронных и нанометровых диапазонах для более точных результатов в сравнении с традиционными оптическими методами.

Автоматизация и эффективность обработки данных. Современные ВИС с программным обеспечением для автоматической обработки и анализа изображений нейтрализуют человеческий фактор, ускоряют процессы измерений и обработки больших объемов данных.

Визуализация и документирование результатов. ВИС способны сохранять изображения и видеозаписи измерений, облегчая документирование результатов, проведение измерений и анализ изменений во времени.

Удаленный доступ и интеграция с цифровыми технологиями. Интеграция ВИС в компьютерные сети и системы хранения данных допускает удаленный мониторинг и управление

¹⁰ Госреестр СИ здесь и далее – Государственный реестр средств измерений; представлен в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений в разделе «Сведения об утвержденных типах средств измерений».

процессами измерений для комфорта пользователей и коллаборации, чего сложно достичь традиционными оптическими методами.

Законодательная основа применения ВИС

ВИС как СИ регулируются требованиями ст. 9 Федерального закона № 102¹¹. Следовательно, к применению допускаются СИ утвержденного типа, прошедшие поверку в соответствии с положениями настоящего закона, обеспечивающие соблюдение установленных законодательством Российской Федерации обязательных требований, включающих:

- обязательные метрологические требования к измерениям;
- обязательные метрологические и технические требования к СИ.

Конструкции современных многофункциональных ВИС совмещают возможности трехкоординатных измерительных машин (91730-24, 90533-23, 78908-20 – номера изделий в Госреестре СИ). Укомплектованные контактными или лазерными датчиками для проведения измерений по высотной отметке, ВИС требуют применения концевых мер длины – для проведения процедуры поверки, применения эталонных сфер – для оценки погрешности измерительных головок.

ШМД как средство оценки ВИС

ШМД – разновидность мер, имеющая ряд штрихов, нанесенных через определенные интервалы по всей длине меры или на отдельные ее участки. В соответствии с требованиями ГПС для средств измерений длины¹², поверка ВИС проводится прямым методом с использованием ШМД. ГОСТ 12069–90¹³ устанавливает ШМД в качестве шкал приборов и станков для измерений линейных размеров или перемещений. Основное назначение ШМД – применение в качестве рабочих эталонов для поверки

микроскопов разных типов, видеоизмерительных машин и систем.

Обзор и классификация ШМД

Значение длины интервала штриховой меры определяется кратчайшим расстоянием между осями штрихов шкалы. В зависимости от интервалов между штрихами ШМД называют:

- однозначной: мера имеет два штриха;
- многозначной: мера имеет ряд штрихов, нанесенных через определенные интервалы по всей длине или на отдельных участках. Многозначные штриховые меры изготавливаются с разными интервалами в зависимости от измерительных задач, чаще всего это дециметровые, сантиметровые и миллиметровые интервалы.

Для изготовления ШМД используют преимущественно материалы с низким значением температурного коэффициента линейного расширения, в основном сталь и стекло. Обобщим основные метрологические и технические характеристики ШМД (табл. 1).

Обзор нормативной базы в части метрологического обеспечения ШМД

Постановление Правительства Российской Федерации № 734¹⁴ допускает в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений только аттестованные в установленном порядке эталоны.

В Российской Федерации основным нормативным документом, устанавливающим порядок передачи единицы длины ШМД, служит ГПС длины для СИ длины¹⁵. В соответствии с указанной ГПС ШМД могут быть аттестованы в качестве вторичных эталонов и рабочих эталонов:

- ШМД в диапазоне от 0,001 до 1 000 мм, аттестованные в качестве вторичных эталонов; единица длины передается от ГПЭ

¹¹ Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ.

¹² Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29.12.2018 № 2840.

¹³ ГОСТ 12069–90 Меры длины штриховые брусковые. Технические условия.

¹⁴ Об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений: Постановление Правительства Российской Федерации от 23 сентября 2010 г. № 734 (ПР 108–2010) (с изменениями и дополнениями).

¹⁵ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм: приказ ...№ 2840. Приложение Б.

Таблица 1. Основные метрологические и технические характеристики штриховых мер длины по ГОСТ 12069–90

Table 1. Basic metrological and technical characteristics of line standards of length according to GOST 12069–90

Наименование характеристики	Класс точности	Значение ²
Номинальная длина шкалы, мм	–	от 1 до 2 000 мм
Допускаемое отклонение длины мер ¹ , мкм, не более	0	$0,5 + 0,5 \cdot L$
	1	$1 + 1 \cdot L$
	2	$2 + 2 \cdot L$
	3	$5 + 5 \cdot L$
	4	$10 + 15 \cdot L$
	5	$20 + 30 \cdot L$
Допускаемое изменение длины меры вследствие нестабильности материала на 1 м длины в течение 1 года, мкм, не более	0	0,15
	1	0,30
	2	1,00
	3	2,00
	4, 5	Не более 1/3 допускаемого отклонения номинальной длины
Допуск плоскостности поверхности шкалы, мкм, не более	0	10
	1,2	16
	3	25
	4	40
	5	60
Ширина штриха, мкм	0, 1, 2	от 3 до 8
	3	от 8 до 20
	4, 5	от 20 до 100

¹ Допускаемое отклонение длины ШМД и интервалов, установленных в горизонтальное положение при температуре 20 °С (или приведенной к ней).

² L, значение длины любого интервала в пределах номинальной длины меры, м.

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

методом прямых измерений; среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности S_{Σ} результатов сличений с ГПЭ составляет $(0,03 + 0,1 \cdot L)$ мкм, где L – длина, м;

– ШМД в диапазоне от 0,001 до 1 000 мм, аттестованные в качестве рабочих эталонов 1-го разряда; единица длины передается от ШМД, аттестованных в качестве вторичных эталонов,

методом сличений на компараторе или методом прямых измерений на установках для проверки штриховых мер длины, аттестованных в качестве вторичных эталонов; доверительные границы абсолютной погрешности δ эталонов 1-го разряда при доверительной вероятности 0,99 составляют $(0,1 + 0,2 \cdot L)$ мкм, где L – длина, м;

– ШМД в диапазоне от 0,001 до 1 000 мм, аттестованные в качестве рабочих эталонов 2-го разряда; единица длины передается от ШМД, аттестованных в качестве рабочих эталонов 1-го разряда, методом сличений на компараторе; доверительные границы абсолютной погрешности δ эталонов 2-го разряда при доверительной вероятности 0,99 составляют $(0,2 + 0,5 \cdot L)$ мкм, где L – длина, м;

– ШМД в диапазоне от 0,001 до 1 000 мм, аттестованные в качестве рабочих эталонов 3-го разряда; единица длины передается от ШМД, аттестованных в качестве рабочих эталонов 2-го разряда, методом сличений на компараторе; доверительные границы абсолютной погрешности δ эталонов 3-го разряда при доверительной вероятности 0,99 составляют $(1 + 5 \cdot L)$ мкм, где L – длина, м;

– ШМД в диапазоне от 0,001 до 1 000 мм, аттестованные в качестве рабочих эталонов 4-го разряда; единица длины передается от ШМД, аттестованных в качестве рабочих эталонов 3-го разряда, методом сличений на компараторе; доверительные границы абсолютной погрешности δ эталонов 4-го разряда при доверительной вероятности 0,99 составляют $(20 + 30 \cdot L)$ мкм, где L – длина, м.

Обзор технических средств передачи единицы длины ШМД

Единственный регламентирующий порядок проведения измерений ШМД нормативный документ – разработанная в 80-е гг. прошлого столетия методическая инструкция МИ 1987-89¹⁶ – устанавливает методы и средства поверки образцовых и рабочих ШМД. Приведенные во «Введении» настоящей статьи данные свидетельствуют о том, что с момента его утверждения технологические возможности ВИС и ШМД несоизмеримо изменились, так что данная инструкция утратила соответствие современным реалиям.

В табл. 2 представлена сводная информация по техническим средствам поверки и аттестации ШМД, а также их доступности.

Обзор методов передачи единицы длины ШМД В Российской Федерации

В соответствии с действующей ГПС длины определены три метода передачи единицы длины ШМД:

– метод прямых измерений;

¹⁶ МИ 1987-89 «Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Меры длины штриховые. Общие требования к поверке».

Таблица 2. Сводная информация по техническим средствам поверки и аттестации ШМД и их доступности в современных условиях по МИ 1987-89

Table 2. Information on technical means of verification and certification of line standards of length and their availability in modern conditions according to MI 1987-89

СИ, тип СИ (при наличии)	Разряд	Назначение	Доступность	Поверка
ШМД	Вторичный эталон	Поверка ШМД 1-го разряда	Отсутствуют: – СИ утвержденного типа; – информация об аттестации эталонов. Не производятся в РФ	ГЭТ
Установки для поверки ШМД Интерференционные установки для поверки ШМД со стабилизированным He-Ne лазером	Вторичный эталон	Поверка ШМД 1-го разряда	Отсутствуют: – СИ утвержденного типа; – информация об аттестации эталонов. Не производятся в РФ	ГЭТ

Окончание табл. 2

End of Table 2

СИ, тип СИ (при наличии)	Разряд	Назначение	Доступность	Поверка
Компараторы для поверки ШМД 1-го разряда	—	Поверка ШМД 1-го разряда	Не производятся в РФ	—
ШМД, класс точности 0, 1; тип I, II по ГОСТ 12069–90	1-й разряд	Поверка ШМД 2-го разряда	Отсутствуют СИ утвержденного типа. Не производятся в РФ	ГЭТ
ШМД, объект-микрометры типа ОМО, ОМП	1-й разряд	Поверка анализаторов фрагментов микроструктуры твердых тел	Меры длины штриховые высокоточные ГРСИ 60060-15, объект-микрометры ГРСИ 78033-20, 28962-16	ГЭТ
Компараторы для поверки ШМД 2-го разряда типа ИЗА-2, ИЗА-8	—	Поверка ШМД 2-го разряда	Максимальный диапазон измерений – до 200 мм Сняты с производства в РФ	—
ШМД, класс точности 2, 3; тип I, II, IV по ГОСТ 12069–90	2-й разряд	Поверка: – ШМД 3-го разряда; – ВИС; – оптико-механических приборов и микроскопов	Меры длины штриховые ГРСИ 76752-19 (только до 400 мм) Не производятся в РФ	РЭ 1-го разряда – до 200 мм включительно ГЭТ – в диапазоне от 200 до 1 000 мм
Компараторы для поверки ШМД 3-го разряда	—	Поверка ШМД 3-го разряда	Не производятся в РФ	—
ШМД, класс точности 4, 5; тип II, III, IV по ГОСТ 12069–90	3-й разряд	Поверка: – ШМД 4-го разряда; – приборов измерительных двухкоординатных	Не производятся в РФ	РЭ 1–2 разряда – до 200 мм включительно ГЭТ – в диапазоне от 200 до 1 000 мм
Компараторы для поверки ШМД 4-го разряда	—	Поверка ШМД 4-го разряда	Не производятся в РФ	—
ШМД, класс точности 4, 5; тип II, III, IV по ГОСТ 12069–90	4-й разряд	Поверка средств измерений	Не производятся в РФ	Рабочие эталоны 3-го разряда

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

- сличение при помощи компаратора;
- метод непосредственного сличения.

Метод прямых измерений реализуется на ГПЭ метра¹⁷ (далее по тексту ГЭТ длины), а также предусмотрен для передачи единицы длины ШМД при проведении работ на установках для поверки штриховых мер длины в диапазоне от 0,001 до 1000 мм, аттестованных в качестве вторичных эталонов.

В состав ГЭТ длины входят следующие средства измерений¹⁸:

- источник эталонного излучения – He-Ne/I2 лазер, стабилизированный по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде-127;
- установка для измерений разности частот источников лазерного излучения;
- универсальный интерференционный метровый компаратор;
- лазерный интерференционный тридцатиметровый компаратор;
- лазерный интерференционный компаратор для измерений длины в субмикронном и нанодиапазоне;
- гетеродинный интерферометр.

Номинальное значение длины волны, при котором воспроизводится единица, составляет 0,633 мкм. Расширенная неопределенность измерений – $U = 1,16 \cdot 10^{-11}$ м.

Метр как единица SI¹⁹ устанавливается фиксацией численного значения скорости света в вакууме с равным в точности $299\,792\,458 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, где секунда определена через частоту перехода в цезии $\Delta\nu_{Cs}$.

На ГПЭ длины также, как и на исходных эталонах всех стран-участниц Метрической конвенции, единица длины воспроизводится в соответствии с рекомендациями BIPM.

Сличение при помощи компаратора проводят преимущественно на компараторах типа ИЗА-2 (рис. 1), которые позволяют проводить измерения ШМД 2-го разряда в диапазоне

значений от 1 до 200 мм. Данные компараторы производства Ленинградского оптико-механического объединения им. В. И. Ленина разрабатывались в 50-х гг. прошлого столетия и в настоящее время сняты с производства. Компараторы в диапазоне измерений свыше 200 мм в настоящее время в нашей стране не производятся, практически все штриховые меры указанного диапазона проходят процедуру аттестации на ГПЭ.

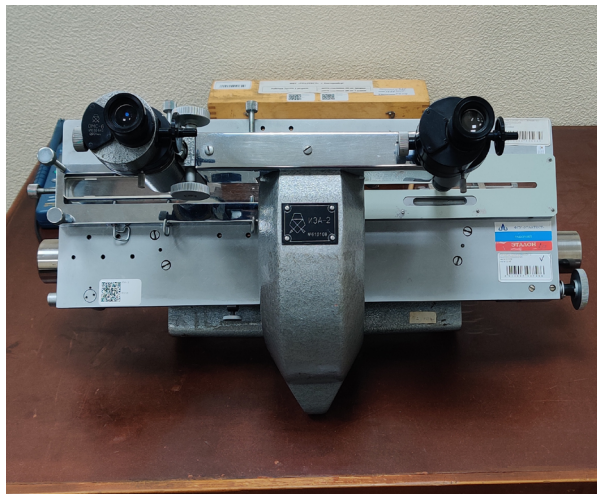


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным /
The figure is prepared by the authors using their own data

Рис. 1. Компаратор горизонтальный, ИЗА-2

Fig. 1. Horizontal comparator, IZA-2

Метод непосредственного сличения представляет собой сопоставление ШМД с образцовой мерой: обе меры располагают параллельно так, чтобы их начальные штрихи совпадали, затем визуально или с помощью лупы определяют разность штрихов в нескольких точках по всей длине шкалы²⁰.

Данный метод, в первую очередь, применяется для ШМД 4-го разряда, а также для рабочих СИ, таких как измерительные металлические линейки и рулетки, которые также являются ШМД.

Зарубежный опыт

Исходные эталоны единицы длины ведущих мировых институтов метрологии представлены на рис. 2 (а, б, в, г).

²⁰ Бирюков Г. С., Серко А. Л. Измерения геометрических величин и их метрологическое обеспечение / Учебное пособие. М. : Изд-во стандартов, 1987. 368 с.

¹⁷ ГЭТ 2–2021 Государственный первичный эталон единицы длины – метра.

¹⁸ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 100 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм: приказ ...№ 2840.

¹⁹ Международное бюро мер и весов (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) [сайт]. URL: www.bipm.org.



Рисунок заимствован авторами из источника*, лицензия CC BY3.0 IGO / The figure is reproduced from* under CC BY3.0 IGO

- а) интерферометр для измерения линейных шкал,
Финляндия (MIKES, Finland)
а) Linear Scale Interferometer, Finland (MIKES,
Finland)



Рисунок заимствован авторами из источника**, лицензия CC BY3.0 IGO / The figure is reproduced from** under CC BY3.0 IGO

- б) машина для измерения линейных шкал,
Великобритания (NPL, United Kingdom)
б) Linear Scale Measuring Machine, UK (NPL, United
Kingdom)

*EUROMET.L-K7.2006 – Key Comparison: Calibration of line scales / Metrology Institute of the Republic of Slovenia, University of Maribor // Physikalisch-Technische Bundesanstalt Bundesallee : [website]. URL: <https://www.bipm.org/documents/20126/45451722/EUROMET.L-K7.2006.pdf/5e623fe8-9a80-810a-5f4e-d6faff11d4c8> (Accessed 07 July 2025).

** Там же. С. 92.



Рисунок заимствован авторами из источника***, лицензия CC BY3.0 IGO / The figure is reproduced from*** under CC BY3.0 IGO

- в) компаратор для измерения линейных шкал,
Канада (NRC, Canada)
в) Linear Scale Comparator, Canada (NRC, Canada)



Рисунок заимствован авторами из источника****, лицензия CC BY3.0 IGO / The figure is reproduced from**** under CC BY3.0 IGO

- г) компаратор с нанометровым разрешением,
Германия (PTB, Germany)
г) Nanometer Resolution Comparator, Germany (PTB,
Germany)

Рис. 2. Исходные эталоны единицы длины ведущих мировых институтов метрологии (по данным EUROMET.L-K7.2006 – Key Comparison: Calibration of line scales)

Fig. 2. Initial standards of the measurement unit of length of the world's leading metrology institutes (according to EUROMET.L-K7.2006 – Key Comparison: Calibration of line scales)

*** Там же. С. 121.

**** Length and Angle Graduations: Measurement Equipment : The Nanometer Comparator // Physikalisch-Technische Bundesanstalt Bundesallee : [website]. URL: <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt5/fb-52/ag-521/messgeraete521.html> (Accessed 07 July 2025).

Указанные исходные эталоны реализуют прямой метод измерения, основанный на интерференции излучения стабилизированного по частоте излучения лазера. Исходные эталоны имеют схожую структуру и содержат аналогичные элементы:

- систему привода;
- систему снятия отсчета;
- интерферометр перемещения;
- систему контроля условий окружающей среды;
- программное обеспечение для управления эталоном.

Принципиальная схема измерений, на которой основан прямой метод измерений ШМД, базируется на явлении интерференции света и заключается в измерении перемещений в количестве длин волн источника лазерного излучения посредством лазерных интерферометров²¹, построенных на схеме интерферометра Майкельсона.

Интерферометр Майкельсона – двухлучевой интерферометр, предназначенный для измерения расстояний или изменений показателя преломления среды. В таком устройстве интерферируют два когерентных пучка: опорный и измерительный. В лазерном интерферометре Майкельсона, где в качестве источника используется стабилизированный по частоте излучения лазер, происходит сравнение изменения оптического пути для измерительного пучка с длиной волны лазера (в видимой области – доли мкм). Этим определяется высокая точность измерений²².

Основными параметрами, определяющими качество лазерных интерферометрических систем, являются [3]:

- разрешающая способность;

- точность измерений;
- повторяемость результатов;
- скорость измерения.

На рис. 3 представлена принципиальная схема гетеродинного лазерного интерферометра.

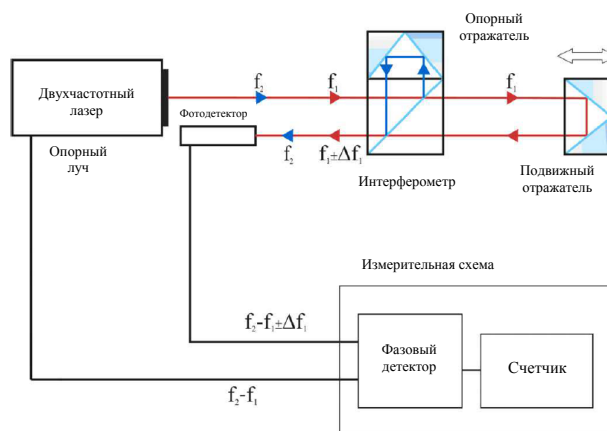


Рисунок заимствован и адаптирован авторами из источника [3], лицензия CC BY4.0 / The figure is reproduced and adapted from [3] under CC BY4.0

Рис. 3. Схема гетеродинного лазерного интерферометра [3]

Fig. 3. Layout of a heterodyne laser interferometer [3]

Результаты и обсуждение

На основании анализа содержания законодательных и нормативных документов, обобщения литературных данных, а также собственного профессионального опыта авторы выявили следующие ограничения.

Назрела острая необходимость модернизации материально-технической базы для метрологического обеспечения ШМД. Заложенные в СССР более полувека назад фундаментальные принципы измерительного оборудования исчерпали моральный ресурс и в настоящее время не отвечают современным требованиям научно-производственного прогресса. В качестве готовых решений по лазерным интерферометрам заслуживают внимания внесенные в ФИФ ОЕИ экземпляры, для которых установлены метрологические характеристики, соответствующие на определенных диапазонах требованиям, предъявляемым, в том числе, ко вторичным эталонам. Описаны примеры использования лазерных интерферометров XL-80 фирмы Renishaw в составе установок для поверки штриховых мер длины [4].

²¹ Интерферометром принято называть прибор, принцип действия которого основан на разделении пучка света на два или несколько когерентных пучков, разность фаз которых постоянна во времени и проходящих различные оптические пути до момента, когда их снова сводят вместе. Если источником световых волн является лазер, то такое перераспределение устойчиво во времени, и в плоскостях локализации можно наблюдать стабильную интерференционную картину в виде темных и светлых полос или колец [4].

²² Гладышева Т. М., Гладышев В. О., Скуйбин Б. Г., Кауц В. Л. Интерферометр Майкельсона. Лабораторный практикум по курсу физики. М. : МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2015. 26 с.

Цифровые методы обработки информации имеют подавляющее преимущество перед оптическими методами [5]. Технологии искусственного интеллекта и машинного зрения позволяют использовать для решения этих задач ПЗС-камеры. Приходится констатировать отсутствие в российском научном сообществе данных за предыдущие 20–30 лет о разработке и создании отечественных новых средств измерений для метрологического обеспечения ШМД. Большинство работ 70–80-х гг. XX века [6–10] основано на методе передачи единицы длины методом компарирования, который на тот момент был предпочтителен в соответствии с рекомендациями МБВМ.

Метод передачи единицы длины ШМД методом компарирования, адаптированный к современным реалиям, с автоматизированной системой снятия отсчета может быть использован при условии устранения следующих ограничений:

- в Российской Федерации отсутствует производство ШМД свыше 1 мм;
- существующие рабочие эталоны 1-го, 2-го, 3-го и 4-го разрядов (являются СИ) произведены более 30 лет назад и вскоре достигнут предельного срока эксплуатации.

Аналогичная ситуация и с компараторами любых типов: отсутствие производства отечественных и доступности импортных. Компараторы как технические устройства характеризуются понятиями «срок эксплуатации» и «срок службы». Однако соответствовать указанным понятиям проблематично ввиду отсутствия производства комплектующих для своевременного ремонта подвижных частей и элементов из их состава.

Обобщим причины, тормозящие процесс модернизации системы метрологического обеспечения ШМД:

- отсутствие производства современных измерительных приборов в Российской Федерации;
- отсутствие производства отечественных ШМД;
- отсутствие отечественного производства и обслуживания имеющихся средств поверки и калибровки ШМД.

Своевременное устранение перечисленных выше ограничений позволит не допустить

экономический ущерб предприятиям промышленности и науки, вызванный отсутствием возможности проведения работ по поверке и калибровке микроскопов разных типов. Оснащенность отечественных пользователей микроскопами косвенно характеризуется данными ФИФ ОЕИ²³. Ниже (табл. 2) представим выборку о количестве проведенных работ по поверке микроскопов, составленную по следующим признакам:

- общее количество микроскопов: поиск по наименованию типа СИ «микроскоп»;
- микроскопы УИМ: поиск по наименованию типа СИ «микроскоп», тип СИ «УИМ»;
- микроскопы ИМЦЛ: поиск по наименованию типа СИ «микроскоп», тип СИ «ИМЦЛ»;
- микроскопы БМИ: поиск по наименованию типа СИ «микроскоп», тип СИ «БМИ»;
- микроскопы МПБ: поиск по наименованию типа СИ «микроскоп», тип СИ «МПБ»;
- видеоизмерительные машины и системы: поиск по наименованию типа СИ «видеоизмерит»;
- анализаторы фрагментов микроструктуры твердых тел: поиск по регистрационным номерам типа СИ 27438-04, 27438-09, 27438-10, 85829-22.

Данные табл. 3 отражают рост количества работ по поверке видеоизмерительной аппаратуры, причины которого имеют долгосрочный характер:

- оптико-механические микроскопы типа УИМ, ИМЦЛ, БМИ в настоящее время сняты с производства и имеют естественные ограничения по сроку службы и эксплуатации;
- увеличение потребности пользователей видеоизмерительных систем в современных технологиях проведения измерений в автоматическом режиме, в том числе – без участия оператора.

Авторами представляется долгосрочная тенденция роста количества эксплуатируемых ВИМ преимущественно в диапазоне измерений свыше 200 мм. Отсутствие отечественного производства ШМД (табл. 1) в диапазоне свыше 200 мм приводит к критической нагрузке на систему метрологического обеспечения ВИМ.

²³ Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/cm/results> (дата обращения: 07.07.2025).

Таблица 3. Количество микроскопов разных типов, поверенных с 2021 по 2024 гг.
Table 3. Number of microscopes of different types verified from 2021 to 2024

	Количество поверенных СИ по данным ФИФ ОЕИ					Наличие произ-водства ШМД для поверки в РФ
	2021	2022	2023	2024	Рост с 2021 к 2024 г., %	
Общее количество микроскопов	6 900	7 430	8 137	8 506	23	
Микроскопы УИМ	1 063	1 144	1 147	1 182	11	нет
Микроскопы ИМЦЛ	347	324	360	340	-2	нет
Микроскопы БМИ	818	843	969	923	13	нет
Микроскопы МПБ	3 554	3 972	4 340	4 652	31	нет
Видеоизмерительные машины и системы	402	498	693	893	122	нет
Анализаторы фрагментов микроструктуры твердых тел	229	254	329	347	52	да

Таблица составлена авторами / The table is prepared by the authors

Заключение

Представленный в статье анализ актуального состояния сфере метрологического обеспечения ШМД обосновывает необходимость разработки и создания современной установки для поверки ШМД, соответствующей требованиям, предъявляемым ко вторичным эталонам единицы длины.

Преимущества и возможности, которые получит благодаря указанной установке система метрологического обеспечения ВИМ:

- опыт создания установки станет отправной точкой в производстве прогрессивных средств измерений, конструкции которых включают прецизионные направляющие: например, длинномеры – для проведения измерений внутренних и наружных размеров; компараторы – для поверки ШМД низших разрядов;

- с появлением установки можно организовать промышленный выпуск отечественных ШМД, у которых точность позиционирования при изготовлении является одним из наиболее важных факторов;

- массовая эксплуатация установки снизит чрезмерную нагрузку с ГПЭ, основной задачей которого является воспроизведение и передача вторичным эталонам единицы длины;

–кратно повысится производительность работ по поверке, калибровке и аттестации ШМД.

Обсуждение путей решения отмеченных в данной статье проблем совершенствования системы метрологического обеспечения ВИМ авторы продолжают в следующих публикациях, представив ряд проектов установок для метрологического обеспечения ШМД разных диапазонов.

Благодарности: Авторы выражают благодарность Н. А. Кононовой и В. А. Сясько за представленную информацию и ценные замечания при подготовке статьи.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to N. A. Kononova and V. A. Syasko for the information provided and valuable comments during the preparation of the article.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье. Работа выполнена в рамках диссертационного исследования «Разработка и исследование установки для поверки штриховых мер длины 1 разряда методом прямых измерений с использованием лазерного интерферометра». Научный

консультант: Чекирда К. В., канд. техн. наук, заместитель генерального директора по метрологии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Conflict of interests: The authors declare no conflict of interest. The work was carried out within the framework of the dissertation research “Development and study of the installation for verification of line standards of length of 1st grade by the method of direct measurements using a laser interferometer.” Scientific consultant: Chekirda K. V., Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director for Metrology of the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology.

Вклад соавторов: Чекирда К. В. – редактирование рукописи, руководство исследованием; Милорадов В. В. – концептуализация,

методология, проведение исследования, анализ данных, визуализация, создание черновика рукописи.

Contribution of the authors: Chekirda K. V. – editing the manuscript, supervising the research; Miloradov V. V. – conceptualization, methodology, research, data analysis, visualization, creating a draft of the manuscript.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Левин Г. Г., Минаев В. Л. Цифровая метрология видеоизмерительных систем // Законодательная и прикладная метрология. 2021. № 3 (171). С. 28–33.
2. Митяева А. И. Влияние видеоизмерительных машин на микроэлектронное промышленное производство // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: Сборник тезисов докладов III Международного форума. В 2-х частях, Санкт-Петербург, 08 ноября 2023 г. / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2023. С. 269–270.
3. Kaušinis S., Kasparaitis A., Jakštas A. Length metrology and calibration systems // Modern Metrology Concerns / L. Cocco. 2012. 472 p.
4. Макаревич В. Б., Горошкова А. Н., Стрижевская М. И. Метрологическое обеспечение штриховых мер длины в диапазоне измерений от 0 до 200 мм // Метрология и приборостроение. 2017. № 3 (78). С. 17–19.
5. Котляр Т. Ю. Применение цифровых камер при поверке стеклянных штриховых мер длины // Электротехнические и компьютерные системы. 2012. № 6 (82). С. 72–75.
6. Устройство для аттестации штриховых мер : пат. SU771463 A1 ; заявл. 29.08.1978 ; опубл. 15.10.1980, Бюл. № 38.
7. Интерференционное устройство для измерения штриховых мер : пат. SU1224568 A ; заявл. 21.01.1983 ; опубл. 15.04.1986, Бюл. № 14.
8. Компаратор для поверки штриховых мер длины : пат. SU943523 ; заявл. 20.02.1981 ; опубл. 15.07.1982, Бюл. № 26.
9. Компаратор для поверки штриховых мер : пат. SU847033 ; заявл. 17.09.1974 ; опубл. 15.07.1981, Бюл. № 26.
10. Компаратор для аттестации линейных штриховых мер : пат. SU441444 ; заявл. 14.01.1970 ; опубл. 30.08.1974, Бюл. № 32.

REFERENCES

1. Levin G. G., Minaev V. L. Digital metrology of the video measuring systems. *Legal and applied metrology*. 2021;3(171):28–33. (In Russ.).
2. Mityaeva A. I. Impact of video measurement machines on microelectronic manufacturing. In: *Mathematical methods and models in high-tech production*: Collection of abstracts of the III International Forum, In 2 parts, 08 November 2023, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 2023. P. 269–270. (In Russ.).
3. Kaušinis S., Kasparaitis A., Jakštas A. Length metrology and calibration systems. In: Cocco L. *Modern Metrology Concerns*. 2012. 472 p.
4. Makarevich V. B., Goroshkova A. N., Strizhevskaya M. I. Metrological support for bar measures of length in the measurement range from 0 to 200 mm. *Metrologiya i priborostroenie*. 2017;3(78):17–19. (In Russ.).
5. Kotliar T. Y. Application of digital cameras for calibration of glass line scale. *Elektrotekhnicheskie i komp'uternye sistemy*. 2012;6(82):72–75. (In Russ.).
6. Ezhkin V. E. Device for attestation of bar measures. Patent SU, no. 771463 A1, 1980. (In Russ.).

7. Bolonin A. A. Interference device for measuring bar measures. Patent SU, no. 1224568 A, 1986. (In Russ.).
8. Anisonyan A. S., Fedorov A. D. Comparator for checking bar measures of length. Patent SU, no. 943523, 1982. (In Russ.).
9. Mironenko A. V., Kolyada Yu. B., Tuzov E. V., Yanushkin V. N. Comparator for checking bar measures. Patent SU, no. 847033, 1981. (In Russ.).
10. Borovkov V. A., Delyunov N. F., Malamed E. R., Ol'shevskij Yu. M., Rukavicyn N. N., Skvorczov Yu. S. Comparator for attestation of linear bar measures. Patent SU, no. 441444, 1974. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чекирда Константин Владимирович – канд. техн. наук, заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: K.V.Chekirda@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3462-1027>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Chekirda – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: K.V.Chekirda@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3462-1027>

Милорадов Владимир Викторович – начальник отдела обеспечения единства измерений геометрических величин ФБУ «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в Свердловской области»
620990, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 2а
e-mail: geo@uraltest.ru
<https://orcid.org/0009-0005-6350-8332>

Vladimir V. Miloradov – Head of the Department for Ensuring the Measurement Uniformity of Geometric Quantities, State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in the Sverdlovsk Region
2a Krasnoarmeyskaya st., Yekaterinburg, 620990, Russia
e-mail: geo@uraltest.ru
<https://orcid.org/0009-0005-6350-8332>