

УДК 531.01 (07)

И.В. Пищулина

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
698087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

ИННОВАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ В ТЕХНИКЕ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Деятельность человека неразрывно связана с измерением расстояний, углов, объемов и других физических величин, выражаемых через длину. В свою очередь, точность измерений соответствует уровню развития физической науки и оказывает значительное влияние на прогресс промышленной технологии. Данная статья носит обзорный характер некоторых инновационных методов и оборудования в технике измерения геометрических величин: новые типы толщиномеров, новейшие способы измерения эвольвентных поверхностей, лазерные интерферометры и наноизмерения. Автор рассматривает отдельные статьи выпусков «Мира измерений», из которых видно, насколько сложна аппаратура и механизм обработки результатов для обеспечения требуемой точности измерений в условиях современного производства.

Ключевые слова: методы и средства измерения, геометрические величины, точность, инновационный, нанотехнология.

I.V. Pishchulina

THE INNOVATIVE METHODS AND THE EQUIPMENT IN THE TECHNIQUE OF GEOMETRIC QUANTITIES' MEASUREMENT

Human activity is inextricably linked with the measurement of distances, angles, volumes, and other physical quantities, expressed in terms of length. In the other hand, the accuracy in measuring matches to the level of the development of physical science and has a significant impact on progress of industrial technology. This article is a review of some innovative techniques and equipment in the methods of measurement of geometrical quantities: new types of thickness gauges, new ways of measuring involute surfaces, laser interferometers and nanomeasuring. The authors examine the issues of several articles of «Measurement World», which show how complex the equipment and data processing of the results are for providing the required measurements' accuracy for the modern production.

Key words: methods and tools for measuring, geometric quantities, precision, innovation, nanotechnology.

Измерение геометрических величин относится к одному из древнейших разделов метрологии. И в настоящее время значение этого вида измерений остается очень большим. Сегодня нас окружает громадное количество всевозможных машин и механизмов, которые постоянно совершенствуются и усложняются, а точность изготовления их деталей все время увеличивается. Определение размеров деталей сложной формы, например, лопаток турбин, зубчатых колес, корпусов двигателей и т.д., является сложной метрологической задачей. Решением ее занимаются во всех промышленно развитых странах мира, привлекая к этому значительные финансовые и людские ресурсы.

Нанотехнологии поставили ряд новых специфических задач, обусловленных малыми размерами элементов и структур, с которыми приходится иметь дело в данной области. Здесь, как нигде, актуален тезис: «Если нельзя правильно измерить, то невозможно создать».

История развития науки и техники неразрывно связана с развитием системы, методов и средств измерений. Вся научно-техническая деятельность человека может быть условно представлена единой шкалой размеров (рис. 1). Во главе этой шкалы стоит Первичный эталон единицы длины – метр.

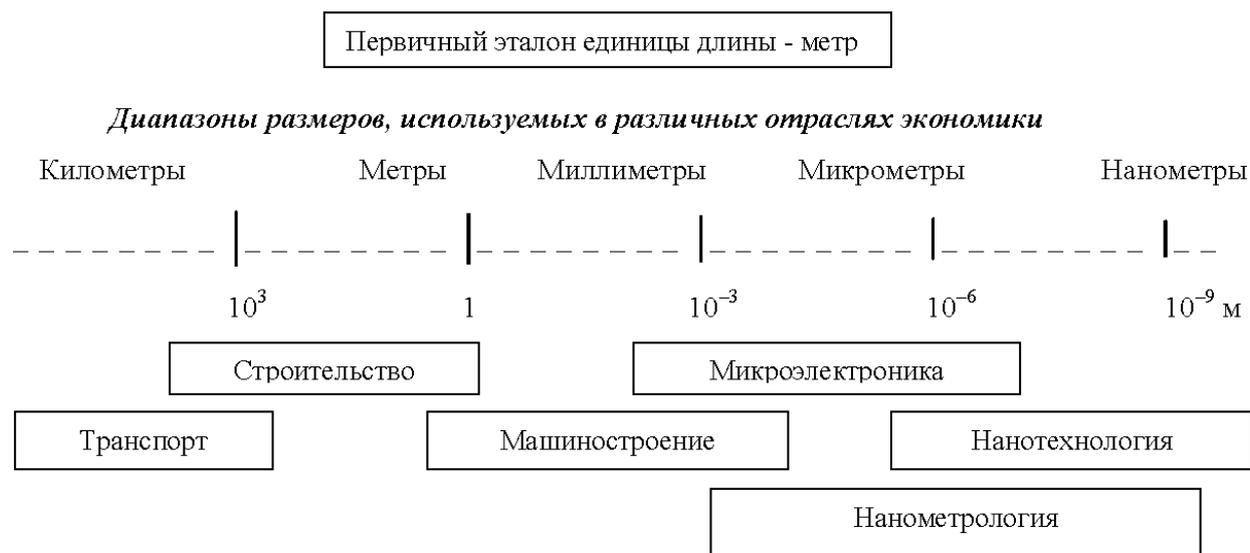


Рис. 1. Шкала линейных размеров в научно-технической деятельности человека
 Fig. 1. The scale of linear dimensions in human's scientific and technical activity

Согласно определению, принятому во Франции в 1791 г., метр был равен 1×10^{-7} части четверти длины парижского меридиана («архивный метр»). Из-за отсутствия точных данных о конфигурации земного шара и значительных погрешностей геодезических измерений в 1872 г. Международная метрическая комиссия приняла решение о принятии «архивного метра» в качестве исходной меры длины. По нему в 1889 г. был изготовлен 31 эталон в виде штриховой меры длины – бруса из платиноиридиевого сплава (9:1). Международный прототип метра и национальные прототипы в течение десятков лет обеспечивали единство и точность измерений, отвечая уровню науки и техники того времени.

В 1960 г. 11-я Генеральная конференция по мерам и весам приняла новое определение метра: «Метр – длина, равная 1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями 2p₁₀ и 5d₅ атома криптона – 86». Современное определение метра в терминах времени и скорости света было введено в 1983 г.: «Метр – это длина пути, проходимого светом в вакууме за 1/299792458 с». Из этого следует, что в системе СИ скорость света в вакууме принята равной 299792458 м/с. Таким образом, определение метра, как и два столетия назад, вновь привязано к секунде, но на этот раз с помощью универсальной мировой константы [1].

Сегодня в качестве источника света для высокоточных измерений длины используют лазер. Лазерный свет обладает особыми качествами, которые являются следствием вынужденного излучения. Именно поэтому наряду с другими многочисленными техническими приложениями лазерный свет подходит и для высокоточных измерений длины – «оптической линейки».

В нашей стране примерно с 1978 г. были начаты работы по созданию нового эталона единицы длины, так как новое определение метра уже предвиделось и необходимо было подготовиться к его реализации. К принятию определения работы были закончены, а в 1985 г., после исследований, был утвержден новый государственный первичный эталон, который успешно функционирует.

Конкурентоспособность наукоемкой продукции определяется обеспечением единства измерений на каждой стадии жизненного цикла изделия, что невозможно без развития и поддержания современной базы во всех массовых видах и областях измерений. Этим обусловлена актуальность и государственная значимость системных научно-исследователь-

ских работ, проводимых государственными метрологическими центрами (ГНМЦ) Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии. В 2004 г. учеными ВНИИМС был разработан, исследован и утвержден Государственный специальный эталон длины для параметров эвольвентных поверхностей и угла наклона линии зуба. Эвольвентные зубчатые зацепления являются одним из основных видов зубчатых передач.

В основу работы эталона положен метод воспроизведения координат дискретных точек теоретической эвольвентной поверхности в полярной и декартовой системах координат.

Введение эталона единиц длины профиля эвольвентной поверхности и угла наклона линии зуба будет иметь важную роль при обеспечении безопасности изделий машиностроения, повышению эксплуатационных показателей качества деталей машин и приборов, использующих эвольвентные зубчатые колеса в высокотехнологичных наукоемких отраслях промышленности [2].

В промышленности выпускается огромное количество деталей сложной формы, у которых надо контролировать не просто длину, ширину и высоту, а точность измерения поверхности сложной формы, ее отклонение от номинальной. Это – эвольвенты, геликоидные и гипоидные поверхности, поверхности турбинных лопаток, асферические поверхности астрооптики, цилиндрические и конические резьбы и т.д. Сейчас точность измерения размеров формы, расположения и шероховатости таких элементов, как зубчатые зацепления, другие детали сложной формы, тонкие пленки и покрытия, элементы трехмерных объектов нанотехнологий в прецизионном машино-и приборостроении, достигла долей микромира и может быть обеспечена стопроцентным контролем.

Для адекватной оценки качества геометрических параметров (ГП) обработанных прецизионных поверхностей как трехмерных объектов необходимы не одномерные, а пространственные методы. Известно, что пространственные измерения ГП поверхностей не могут быть осуществлены прямым аналоговым методом. Для этого необходимы измерения дискретных координат поверхностей в заданной системе координат и последующий расчет ГП по координатам в соответствии с их определением по стандартам. Такой метод измерений называется координатным.

При этом и сами измерения, и последующая обработка в реальном масштабе времени измерительной информации смогли быть осуществлены только с появлением быстродействующей компьютерной техники. Все эти технические устройства как раз и появились тридцать лет назад и дали мощный импульс развитию координатно-измерительной техники. В 1973 г. на базе координатно-расчетного станка швейцарской фирмы SIP была создана первая координатно-измерительная машина (КИМ).

КИМ являются современными измерительными системами, построенными на базе точных измерительных преобразователей и вычислительной техники. Их характеризует не только большая производительность измерений, но и значительный динамический диапазон, а также возможность одновременного измерения большого набора геометрических параметров поверхности детали за один прием [3].

Примером КИМ может служить прибор для контроля размеров, формы и расположения поверхностей деталей типа тел вращения (КИМ-ТВ 800). Машина выдает протокол с указанием диаметров шеек коленчатого вала, отклонений от округлости, цилиндричности, соосности, значений углового расположения шатунных шеек.

Анализ видов размеров, характерных для тел вращения, позволил составить перечень контролируемых размеров и разработать алгоритмы их контроля (рис. 2).

Указанные координатно-измерительные машины в течение ряда лет (от 2 до 10) успешно работают в моторостроительных производствах автомобилей ВАЗ, ГАЗ, УАЗ.

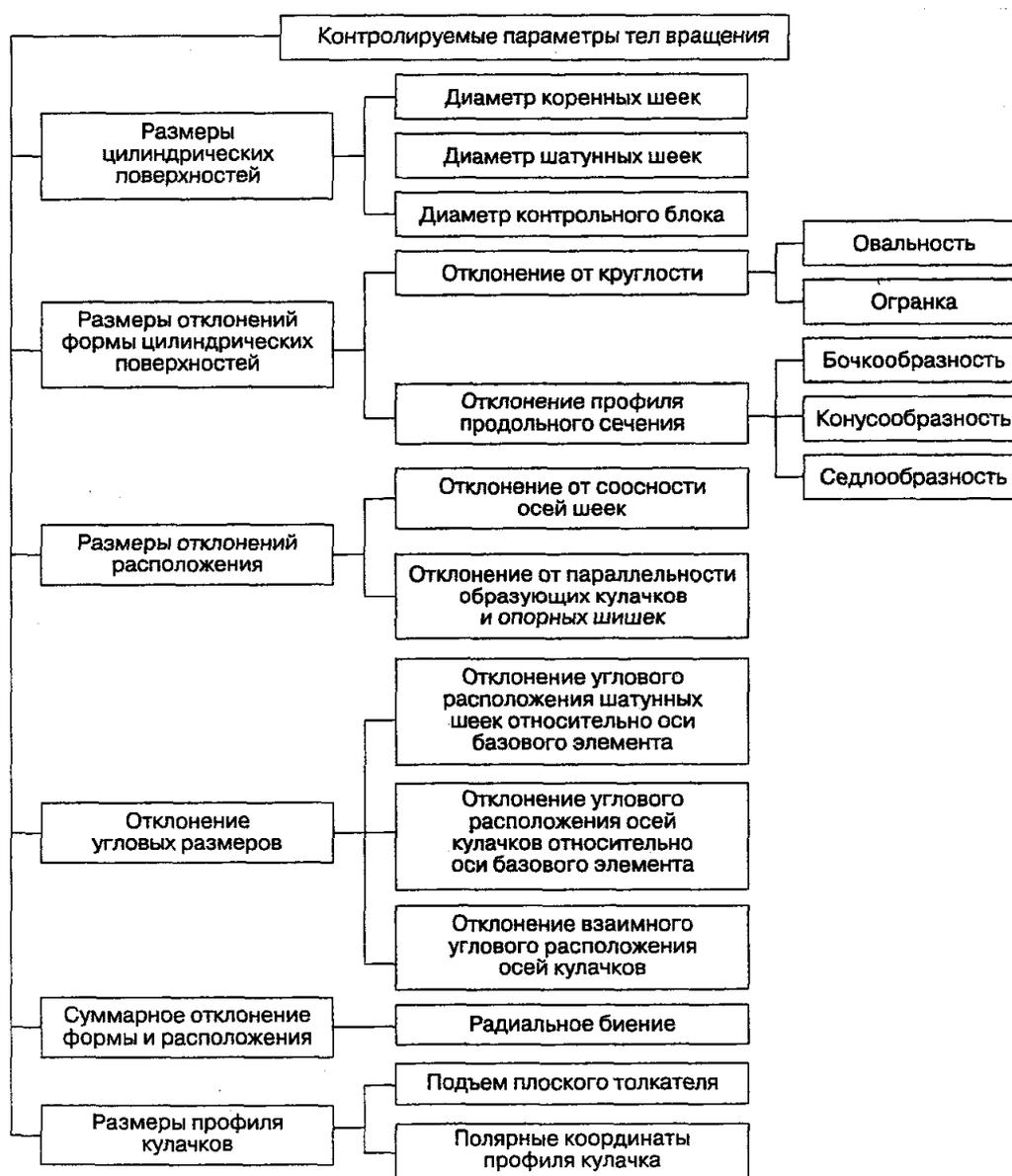


Рис. 2. Структура контролируемых геометрических параметров тел вращения
 Fig. 2. The structure of controlled geometric rates of rotation body

Таким образом, в России создан новый тип координатно-измерительных машин для тел вращения, стоимость которых значительно ниже аналогичных зарубежных, кроме того, программно-математическое обеспечение КИМ-ТВ 800 позволяет получить результаты измерений распределительных валов от различных баз, что дает возможность корректировать технологический процесс их изготовления в отличие от обеспечения зарубежных КИМ [4].

Другой тип измерительного оборудования – толщиномеры. Рентгеновские толщиномеры (РТ) позволяют проводить измерения толщины полосы на прокатных станах с широким сортаментом обрабатываемых металлов и сплавов бесконтактно с высокой чувствительностью и быстродействием при любой шероховатости поверхности и температуре металла. Первое упоминание о применении толщиномеров с использованием ионизирующих излучений относится к 1948 г., когда фирма General Electric применила для измерения толщины проката гамма-излучения от радионуклидных источников на основе америция и ко-

бальта. Низкое быстродействие, ограниченный диапазон контролируемых толщин проката, трудности с утилизацией радионуклидных источников ускорили разработку рентгеновских измерителей проката на основе источников рентгеновского излучения. Наибольшее распространение получили две схемы построения рентгеновских толщиномеров:

- измерение по величине интенсивности потока излучения после прохождения через контролируемый объект (прямое измерение);
- сравнение интенсивностей 2 потоков излучения: прошедшего через контролируемый объект и прошедшего через эталонный образец (измерение сравнением).

В России в течение ряда лет разработаны три поколения рентгеновских толщиномеров холодного и горячего проката, которыми оснащены отечественные металлургические предприятия. Достоинство РТ первого поколения заключается в том, что в момент отсутствия контролируемой полосы можно проводить нормализацию по толщине проката. Использование полученных при помощи математической модели зависимостей от толщины контролируемого изделия поправок на химический состав позволяет уменьшить систематическую погрешность измерения толщины до значений на порядок ниже допустимых ГОСТом.

Серия рентгеновских толщиномеров последнего поколения имеет автоматические системы компенсации изменения химического состава сплава и его дефектности и отвечает высоким требованиям по линеаризации выходного сигнала отклонения от контролируемой толщины проката.

С помощью РТ можно осуществлять контроль стального и цветного листового и трубного проката с переменной толщиной стенки и изменяющейся геометрией с погрешностью измерения 0,2 % от измеряемого значения. Для повышения надежности работы и предотвращения выпуска бракованного проката в РТ встроена система автоматической диагностики. Таким образом, рентгеновский толщиномер является сложным автоматизированным комплексом измерения геометрических величин [5].

Ключевые функциональные компоненты современных технических устройств становятся все меньше и точнее, и тем не менее для эффективного функционирования таких компонентов очень важно, чтобы они двигались плавно и работали скоординировано.

Основным фактором, гарантирующим бесперебойную и длительную службу движущейся рабочей детали, является точное соблюдение при ее изготовлении расчетных размеров и формы. Требования к параметрам округлости, плоскостности, прямолинейности, а также к минимизации биения становятся все более жесткими, особенно, если речь идет об осесимметричных деталях. Допуски на изготовление осесимметричных деталей строго регламентируются. Соблюдение таких допусков на производстве может обеспечить только применение прецизионного прибора для контроля формы, специально оптимизированного для этих целей.

Компания Mahr предлагает производителям инновационные системы MarForm, представляющие собой универсальные ультраточные автоматические приборы для измерения формы деталей.

Под этой маркой выпускается серия настольных приборов для измерения отклонения формы и расположения поверхностей (формтестеров). Прибор рассчитан на работу в цеховых и лабораторных условиях, надежен в эксплуатации и обеспечивает точность измерений параметров округлости, круглости сектора, радиального и осевого биения, концентричности, соосности, плоскостности, прямолинейности, параллельности и перпендикулярности, плоскопараллельности противоположных кругов. Выполняет гармонический анализ и анализ волнистости [6].

Прецизионные системы пространственных измерений серии Precimar производства компании Mahr предназначены для поддержки инспектирования линейных размеров (аб-

солютных и относительных измерений) точных деталей. Эти системы широко применяются для контроля качества продукции в авиационной и автомобильной промышленности, а также для поверки тестового оборудования в калибровочных лабораториях.

Измерительные машины серии Ptesimar позволяют надежно и с высочайшей точностью измерять длины, внешние и внутренние диаметры, цилиндрические и конические резьбы, гладкие конусы и даже прецизионную наномасштабную продукцию, а также поверять микрометры, калибр-скобы, индикаторы, датчики и концевые меры длины (КМД).

Одним из самых часто используемых на производстве приборов для линейных измерений является Linear 100 – универсальный, простой в эксплуатации промышленный длиномер для быстрого и точного выполнения внешних и внутренних измерений в диапазоне до 100 мм.

Универсальные дальномеры марки ULM применяют при прецизионных линейных измерениях точных деталей, таких как зубчатые зацепления, цапфы, ступицы, сепараторы шарикоподшипников, обоймы шарикоподшипников, валы редукторов и т.д. Данные дальномеры уже успели оценить такие предприятия, как Иркутский авиационный завод, Новосибирский ЦСМ, Омский ЦСМ [7].

С развитием техники, усложнением процессов производства различных высокотехнологических изделий резко повышаются требования к средствам контроля их геометрических параметров. Для реализации повышенных требований необходимы новые технические решения в области метрологии, включающие создание методов и средств контроля линейных размеров и перемещений, имеющих конечной целью достижение нормированной точности в нанометровом диапазоне.

Нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба.

Метрологическое и нормативно-методическое обеспечение отраслей nanoиндустрии наиболее развито в части измерения линейных или геометрических параметров. Это связано с тем обстоятельством, что нанотехнологии оперируют объектами нанометровой протяженности, из чего естественным образом проистекает первоочередная задача измерений геометрических параметров объекта.

Первостепенная задача опережающего развития нанометрологии – реализация наномасштаба в нанометровом и прилегающих к нему диапазонах. Существенный вклад в исследования в этой области вносит Россия. Достижение предельных возможностей при измерениях длины в нанометровом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методов растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии в сочетании с лазерной интерферометрией и рентгеновской дифрактометрией при сохранении абсолютной привязки к Первичному эталону меры длины – метру. В результате длительных исследований в России концептуально создана основа метрологического обеспечения измерений длины в диапазоне 1...1000 нм [8].

В результате длительных фундаментальных научных и научно-технических исследований и опытно-конструкторских разработок, проведенных в России, были созданы:

- метрологическое обеспечение линейных измерений, включая методы и средства воспроизведения и передачи размера единицы длины в нанометровом диапазоне с абсолютной привязкой к Первичному эталону единицы длины – метру, основанные на принципах сканирующей зондовой микроскопии, лазерной интерферометрии – фазометрии;

- технология получения трехмерных мер микро- и нанорельефа поверхности, обеспечивающих поверку и калибровку сканирующих туннельных, атомно-силовых, растровых электронных микроскопов и других средств линейных измерений в нанометровом диапазоне;

- алгоритмы и пакет программ, позволяющие реализовать автоматизированное трехмерное измерение нанорельефа поверхности конденсированных сред.

Это обеспечивает успешное развитие нанотехнологии в России. В области линейных измерений нанометрового диапазона наша страна опережает другие, по крайней мере, лет на 10-15.

Важнейшей задачей метрологического обеспечения линейных измерений в нанометровом диапазоне является создание вещественных носителей размера – мер с программируемо заданным нанорельефом поверхности, обеспечивающих калибровку средств измерений с наивысшей точностью.

Итак, развитие нанотехнологии ужесточает требования к измерительным системам, погрешности измерений которых должны быть сравнимы с межатомными расстояниями.

Средства измерений геометрических величин нанометрового диапазона существуют несколько десятилетий. Тем не менее их метрологическое обеспечение недостаточно разработано и исследовано для тестирования средств измерений геометрических величин нанометрового диапазона и сравнения результатов измерения этих величин различными методами и средствами.

Для исследования метрологических характеристик атомно-силовых микроскопов Nanoscan, разработанных в России, были использованы тест-объекты, изготовленные планарной технологией с известными геометрическими размерами. Измерения геометрических тест-объектов были выполнены и на других приборах: атомном силовом микроскопе Nanotop (Республика Беларусь), СТМ Р4-SPM-MDT (Россия), контактном профилометре Talystep (Великобритания), модернизированном интерференционном микроскопе МИИ-4 (Россия) [9].

Развитие таких технологий, как производство интегральных схем с микронными и субмикронными размерами, алмазное точение прецизионных зеркал и прочего невозможно без применения лазеров в составе интерферометров. Именно лазерные интерферометры используются при динамических измерениях в нанотехнологиях.

Лазерный интерферометр перемещений – это линейная измерительная система для абсолютных измерений длины путем сравнения с длиной волны стабилизированного по частоте лазера. Интерферометры имеют возможность соединения с ЭВМ и создают основу для перехода на модульный принцип построения оптических измерительных схем. В зависимости от характера решаемых задач собирается нужная конфигурация прибора. Это позволяет расширить круг измеряемых величин – скорости, ускорения, углов поворота, прямолинейности, плоскостности и др.

Главные достоинства этих приборов – высокая точность и широкие пределы измерений – сочетаются с такими факторами, как высокая стабильность световой шкалы, определяемая свойствами атомов, испускающих излучение.

Лазерные интерферометры перемещений незаменимы при производстве сверхбольших интегральных микросхем (СБИС), а также в научных исследованиях, высокотехнологичных производствах, для испытания станков и на обычных рабочих местах, где требуется высокая точность измерения формы и расположения поверхностей, длины, скорости, ускорения, углов и других параметров физических тел.

Применение в составе интерферометров двухчастотных стабилизированных лазеров с повышенной разностной частотой позволяет повысить предельную скорость измерения интерферометров более чем в два раза.

В промышленных лазерных интерферометрах в качестве источника света применяются стабилизированные одно- или двухчастотные гелий-неоновые лазеры, излучающие на длине волны, равной 0,63 мкм.

В настоящее время только Россия и США могут сделать лазеры с повышенной разностной частотой. Но интерес к этим приборам в мире настолько велик, что повсеместно множество фирм-производителей начали выпуск ускоренными темпами лазеров подобного класса. Введение аттестации по длине волны отечественных двухчастотных лазеров типа ЛГН-212-1М позволит повысить их конкурентоспособность и вытеснить с российского рынка лазеры данного класса и назначения других производителей.

Деятельность человека неразрывно связана с измерениями расстояний, углов, объемов и других физических величин, выражаемых через длину. В свою очередь, точность измерений соответствует уровню развития физической науки и оказывает влияние на прогресс промышленной технологии в конце XX и начале XXI вв. Появляются так называемые высокие технологии, из которых важнейшее значение имеют микроэлектроника и нанотехнология.

Достижение предельных возможностей при измерении длины в нанометровом диапазоне связано с использованием высокоразрешающих методов растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии в сочетании с лазерной интерферометрией и фазометрией при сохранении абсолютной привязки к Первичному эталону меры длины – метру.

Все страны, вступившие в нанотехнологический прорыв, прекрасно понимают необходимость опережающего развития метрологии, поскольку именно уровень точности и достоверности измерений способен либо стимулировать развитие научно-технического прогресса, либо служить сдерживающим фактором.

Список литературы

1. Коногонов, С.А. Новый государственный специальный эталон единицы длины для эвольвентных поверхностей и угла наклона линии зуба / С.А. Коногонов, В.Г. Лысенко, В.Г. Фирстов // Мир измерений. – 2004. – № 10. – С. 82-85.
2. Бражкин, Б.С. Контроль размеров формы и расположения поверхностей деталей типа тел вращения / Б.С. Бражкин, В.С. Миротворский, В.Д. Хлебников // Мир измерений. – 2004. – № 6. – С. 8-11.
3. Артемьев, Б.В. Использование рентгеновских толщиномеров для контроля толщины проката цветных металлов / Б.В. Артемьев, А.И. Маслов // Мир измерений. – 2004. – № 6. – С. 12-18.
4. Фурцев, А.И. Измерение высоты подвеса автосцепки / А.И. Фурцев, А.З. Венедиктов, О.В. Пальчик // Мир измерений. – 2007. – № 10. – С. 4-6.
5. Лоскутов, А.А. Новейшие технологии измерения формы изделий / А.А. Лоскутов, А.В. Золотов // Мир измерений. – 2010. – № 8. – С. 34-35.
6. Лоскутов, А.А. Новейшее оборудование для линейных измерений / А.А. Лоскутов, А.В. Золотов // Мир измерений. – 2010. – № 6. – С. 40-41.
7. Протасьев, В.Б. Оценка точности измерений с использованием 3D-моделей / В.Б. Протасьев, В.В. Истоцкий, О.М. Мекеня // Мир измерений. – 2012. – № 7. – С. 18-22.
8. Тодуа, П.А. Нанометрология: время не ждет / П.А.Тодуа // Мир измерений. – 2011. – № 6. – С. 27-35.
9. Лысенко, В.Г. Методы и средства измерений в нанотехнологиях / В.Г. Лысенко, С.С. Голубев, А.В. Пошивалов // Мир измерений. – 2005. – № 8. – С. 10-15.

Сведения об авторе: Пищулина Ирина Валентиновна, старший преподаватель, e-mail: stepka_53@mail.ru.