

# Формирование пакета данных координатных измерений на приборах контроля формы, контура, месторасположения

К. Епифанцев, к. т. н.<sup>1</sup>

УДК 744.42 | ВАК 2.2.4

Процесс измерения деталей на высокоточном оборудовании имеет ряд проблем, которые сводятся к усреднению показаний, доводки измерений с помощью цифровых фильтров до ближайшего среднего результата, что не всегда удобно, если стоит задача измерить мгновенное значение. Это было бы возможно на аналоговых приборах. В статье обсуждается вопрос аналогичных причин, которые могут стать следствием погрешности измерений на КИМ (координатно-измерительной машине).

**В** статье проведен обзор современных моделей и технологических решений для уменьшения погрешностей на координатно-измерительном оборудовании. Подчеркивается важность проведения системного анализа погрешностей. В ряде научных работ исследуется проблема вырождения номинальных поверхностей и линий за счет свойств программ к упрощению процесса измерения и округлению численных данных.

Координатно-измерительные машины (КИМ) – это устройства для измерения геометрических характеристик объекта с помощью высокоточного щупа (рис. 1).

Принцип работы КИМ заключается в последовательном нахождении координат точек. Основные метрологические и технические характеристики машины приведены в табл. 1.

Для управления работой КИМ используется ПО MCOSMOS (рис. 2). Основные функции ПО MCOSMOS [1]:

- хранение программ измерения в локальной сети;
- добавление команд и инструкций для оператора;
- хранение результатов измерения в форматах PDF, XLS, HTML и многих других;
- экспорт измеренных геометрических элементов в CAD-системы.

Калибровка щупа КИМ выполняется по специальной детали, представляющей собой металлическую стойку с закрепленной на ее конце сферой из прочного полимерного материала. Диаметр сферы стабилен



Рис. 1. КИМ с ручным управлением Crysta-Plus M 443

Таблица 1. Метрологические характеристики КИМ

Диапазон измерений, мм	400 × 400 × 300
Погрешность измерений, мкм	±(3 + 0,4L / 100)
Тип направляющих	Воздушный подшипник

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, доцент.

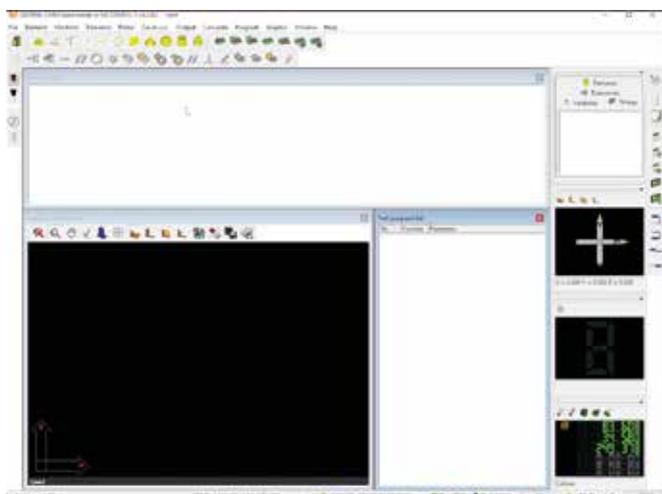


Рис. 2. Вид окна модуля GEOPAK ПО MCOSMOS

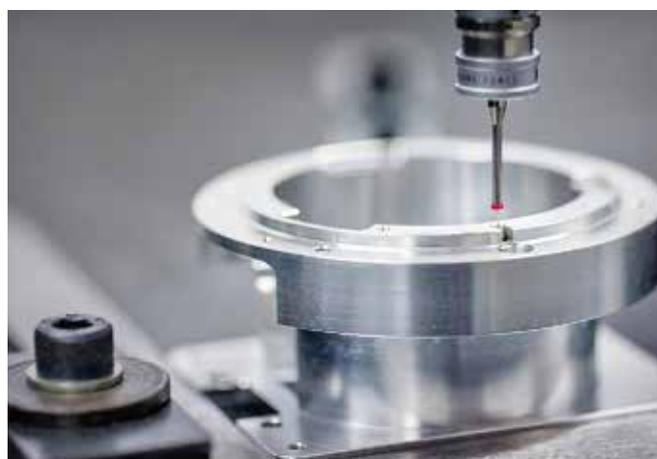


Рис. 3. Калибровочная сфера на предметном столе КИМ и контактный щуп

и определен при ее производстве. В лаборатории используется сфера диаметром 19,9716 мм. Основная цель калибровки заключается в определении диаметра измерительного рубинового наконечника щупа путем соприкосновения его под определенным углом со сферой в нескольких точках. Установка детали на предметный стол КИМ осуществляется по установочному резьбовому отверстию (рис. 3). При этом предпочтительно разместить деталь в средней зоне предметного стола для свободного подвода щупа к сфере.

Рассмотрим алгоритмы формирования данных, снимаемых с головки КИМ, и перспективные виды моделей, описанных различными исследовательскими коллективами [2–7].

В исследовании [4] подчеркивается важность создания измерительных головок нового типа. Авторами подчеркивается, что точность измерений современных измерительных головок касания, как правило, не хуже  $\approx 0,5\text{--}1,5$  мкм. Однако необходимость достижения высокой точности измерений обеспечивается за счет малой скорости подведения наконечника к поверхности изделия с существенным увеличением времени измерений. Одним из путей преодоления этого ограничения является создание и использование высокоточных бесконтактных 3D измерительных головок, лишенных вышеуказанного недостатка. Принцип действия разработанной гибридной 3D измерительной головки позволяет реализовать как

контактные, так и бесконтактные координатные измерения изделий (рис. 4).

Во время контактных координатных измерений используется механическая конструкция 3D измерительной головки, а именно: измерительный стержень 1 со сферическим рубиновым наконечником 2. При подведении и последующем касании таким рубиновым наконечником поверхности изделия 3 измерителем 4 формируется переключающий электромеханический выходной сигнал  $U_k(r) \sim 1(r-r_0)$  с синхронным высокоточным оцифровыванием данной точки, осуществляемым лазерным интерферометром с точностью измерений не хуже 0,1 мкм по трем основным осям  $OX$ ,  $OY$  и  $OZ$ :  $l_x$ ,  $l_y$ , и  $l_z$ .

В исследовании [2] отмечены оптимальные параметры, которые нужно определить, не прибегая к многократным процессам, то есть достаточно измерить лишь несколько конкретных точек, а не весь ряд. Подчеркивается, что

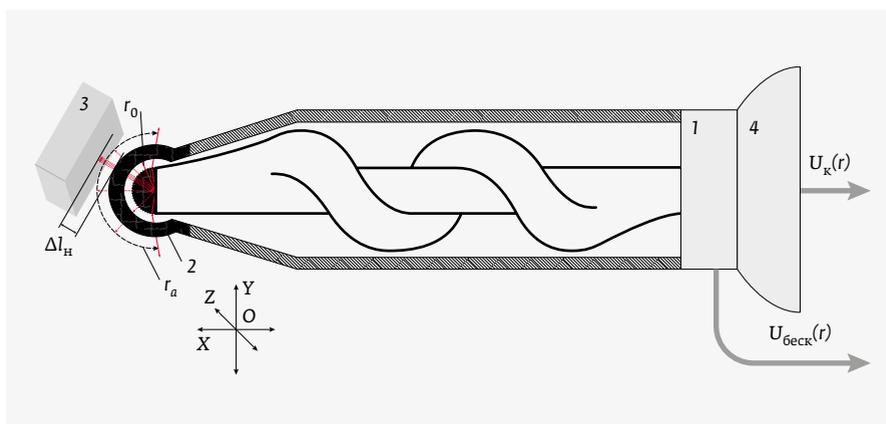


Рис. 4. Гибридная 3D измерительная головка

оценка числа ( $n$ ) точек контроля, гарантирующего относительную погрешность измерений параметра  $\delta$  с вероятностью не меньше 0,99%, определяется по формулам:

$$n = 2, \quad n = \sqrt{2\pi x} \exp\left(\frac{x^2}{2}\right); d\delta = \frac{2,6-x}{2,6}, \quad (1)$$

где  $x$  – случайная величина,  $d\delta$  – относительная погрешность измерений плоскостности, круглости, цилиндричности.

Для нескольких измеряемых точек, которые нужно контролировать на КИМ, получим результат

$$n = \sqrt{2\pi} (1 - d\delta) \exp\left[\frac{(2,6 - 2,6d\delta)^2}{2}\right]. \quad (2)$$

Авторами [3] предлагается нормирование геометрических характеристик на основе введения системы координат, материализованной комплектами баз, приведена альтернативная система координат с учетом информативности координатных плоскостей и осей координат, также приведена классификация элементов по числу ограничений степеней свободы (рис. 5). В работе [3] обращается внимание на то, что для раскрытия взаимосвязи координат отклонений расположения элементов, размеров и отклонений формы их поверхностей необходимо построение геометрической модели объекта. Методология двухмерных измерений является дальнейшим развитием традиционных методологий разовых и допусковых измерений и опирается на основные метрологические принципы,

такие как принцип Тейлора, принцип Аббе, принцип инверсии, единства баз и дополняет их принципом двухмерности геометрических характеристик деталей.

Эта система учитывает разную информативность координатных плоскостей 3+2+1 и осей координат 4+2+0 (ноль) и разные направления отсчетов положительных углов от оси координат с максимальной информативностью 4 (два угла  $A$  и  $B$ ) и один угол  $C$  от оси координат с информативностью 2. Именно такую систему координат детали рекомендуется применять при нормировании геометрических характеристик деталей: допусков расположения и формы, линейных и угловых координат, линейных и угловых размеров элементов деталей. В зависимости от вида поверхностей сопрягаемых базовых элементов (плоскость, сфера, цилиндр, конус, тор, винт, сложнопрофильная поверхность), размеров и количества базовых элементов, сопряжения классифицируются на шесть классов по числу ограничиваемых базами степеней свободы (от одной до шести) и нулевой класс с нулевой подвижностью. При координатных измерениях профиль реальной детали заменяется его моделью, построенной по собранным контрольным точкам. Оптимальным является выбор одной и той же модели для контроля всех геометрических характеристик детали (размера, формы, расположения). Так как допуск формы ограничивается допуском на размер, то модель профиля, построенная для определения отклонения от круглости, может быть использована и для определения размера.

В исследовании [5] введен термин высокочастотные детерминированные неопределенности измерений (ВДНИ), очень важный с точки зрения метрологии. В таких случаях часто используются для измерений мобильные опти-

ко-электронные координатные средства измерений (КСИ): лазерные трекеры. Указанные КСИ, как правило, многофункциональны, имеют сложные схемотехнические решения, связанные с применением дальномерных и угловых измерительных систем. На точность измерений сферических (полярных) координат (радиус-вектора, горизонтальных и вертикальных углов) оказывают влияние такие составляющие неопределенности измерений, как неопределенность при считывании информации, связанная с интерполяцией, дискретизацией и квантованием сигналов в измерительных преобразователях длины и углов, а также взаимное расположение измерительных преобразователей. Указанные составляющие неопределенности измерений

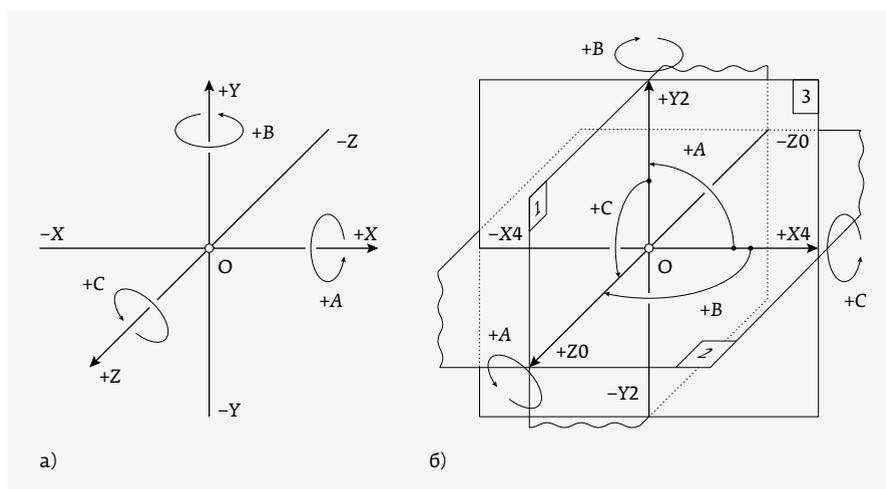


Рис. 5. Правая прямоугольная система координат: а – для металлорежущих станков с ЧПУ по ISO 841-2002; б – альтернативная система координат для нормирования геометрических характеристик

увеличиваются с течением времени и могут проявлять себя как высокочастотные детерминированные неопределенности измерений (ВДНИ), которым в известных в мировой практике методах не уделяется должного внимания. Для выявления ВДНИ вертикального угла используется вертикальный компаратор с эталонным лазерным интерферометром, измерительный канал которого расположен соосно с отражателем исследуемого КСИ. Математическую модель измерения вертикального угла  $\gamma$  исследуемым КСИ в этом случае можно представить функциональной зависимостью по теореме косинусов:

$$\gamma = \arccos \frac{AB^2 + AC^2 - BC^2}{2AB \cdot AC} \quad (3)$$

В формуле (3)  $AC \approx AB$  – расстояния от калиброванно-го по радиус-вектору КСИ до его отражателя;  $BC$  – перемещение каретки вертикального компаратора, измеренное эталонным лазерным интерферометром вертикального компаратора.

В исследовании [6] описываются измерение гиперболической антенны и аппроксимация результатов измерений поверхности второго порядка.

Примером поверхности второго порядка может служить отражатель зеркальной антенны, который представляет собой эллиптический параболоид. Эллиптический параболоид в каноническом виде представлен на рис. 6 и описывается уравнением:

$$z(x, y) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} \quad (4)$$

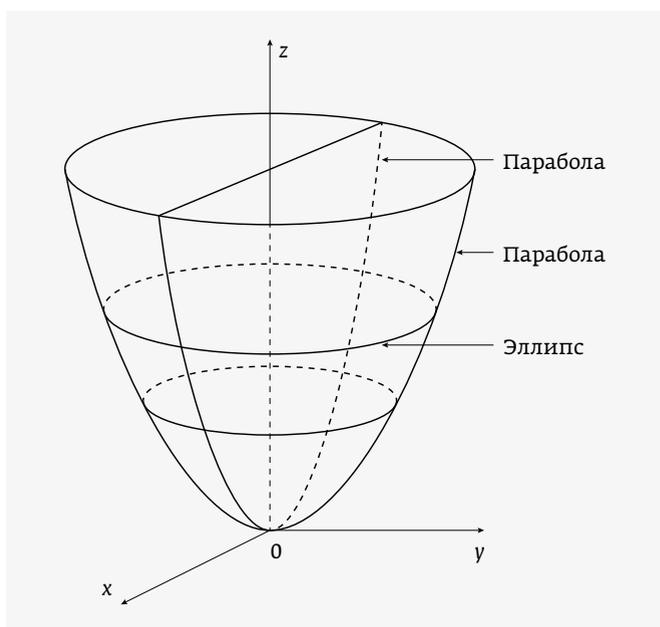


Рис. 6. Эллиптический параболоид в канонической системе координат

Реальная поверхность в процессе изготовления выполняется с некоторыми отклонениями. Основная задача – определить погрешность изготовления реальной поверхности отражателя зеркальной антенны по сравнению с исходной (идеальной) поверхностью, которая была задана изначально (4).

Для получения информации о геометрических параметрах исследуемой поверхности можно использовать КИМ и методы координатных измерений. Рассмотрим общий случай, когда измеряемый отражатель произвольно расположен и ориентирован относительно начала системы координат измерительной машины. Это подразумевает, что он смещен по каждой оси и имеет поворот относительно каждой из осей по сравнению с рисунком. То есть имеются две различные системы координат: СК1 – система координат, в которой задано уравнение (4), и СК2 – система координат измерительной машины. В этом случае поверхность по-прежнему остается эллиптическим параболоидом, но относительно системы координат измерительной машины СК2 описывается общим уравнением поверхности второго порядка:

$$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + 2Fyz + 2Gxz + 2Hxy + 2Px + 2Qy + 2Rz + D = 0 \quad (5)$$

Для того чтобы определить погрешность изготовления отражателя, необходимо совместить измеренные данные  $(x_i, y_i, z_i)$  с канонически заданным уравнением (4).

Для решения поставленной задачи разработана следующая методика обработки измеренных данных:

1. Аппроксимация методом наименьших квадратов (МНК) исходных данных поверхностью второго порядка и определение коэффициентов уравнения (5).
2. Проверка достоверности полученных коэффициентов.
3. Полученное после аппроксимации уравнение (5) описывает произвольно ориентированную в пространстве поверхность. Его необходимо привести к каноническому виду эллиптического параболоида (4). В ходе приведения определить величины смещения СК2 относительно СК1 и матрицу поворота, которая позволит совместить направления осей  $Ox, Oy, Oz$  этих систем координат.
4. Полученные после измерения данные  $(x_i, y_i, z_i)$  преобразуем (сдвигаем и поворачиваем) в соответствии с п. 3, то есть измеренные экспериментальные данные приводим к СК1.
5. Вычисление отклонений приведенных экспериментальных данных от поверхности, заданной уравнением (4).

Предлагаемая методика позволяет получить численные значения отклонений контролируемой поверхности второго порядка от заданной поверхности. Особенностью

является то, что контролируемую поверхность предварительно не требуется базировать, то есть она может находиться в произвольном положении относительно средства измерения. Достоверность полученных результатов проверена путем математического моделирования.

В работе [7] авторами также указывается важность контроля самых незначительных параметров погрешностей, которые сводятся к округлению одних геометрических параметров в другие, более упрощенные, что неоправданно в машиностроении, так как в реальной жизни острая кромка не притупится сама собой.

Авторами [7] выделяются «признаки вырождения» геометрических элементов: отрезка прямой – в точку, дуги окружности и изгиба плоскости – в прямую, цилиндра – в окружность, сферы – в плоскость, асферической поверхности – в сферу, что сильно влияет на точность при проведении координатных измерений. На практике чаще всего встречается плохо обусловленная задача измерения соосности двух цилиндров, когда высота  $h$  одного (базового) много меньше его радиуса  $R$ , сопоставимого с другими характерными размерами детали. Это приводит к большой погрешности определения углового положения оси базового цилиндра и, соответственно, к существенной погрешности измерения соосности цилиндров.

Простейший геометрический анализ показывает, что ряд погрешностей на машинах для измерения дефектов формы имеет существенные погрешности при упрощении геометрических параметров детали и стремлении к их усреднению. Параметр  $h_0/L_0$  является количественной характеристикой степени вырождения дуги окружности в отрезок прямой. Можно провести оценку нормы погрешности координат центра окружности как функции параметра  $h_0/L_0$  и нормы вектора погрешности исходных данных. Установлено, что с высокой точностью эта зависимость описывается эмпирической формулой (6)

$$\|\Delta u_0\| \leq \frac{2\|\Delta u\|}{0,1h_0^4/L_0^4 + h_0^3/L_0^3 + 10h_0^2/L_0^2 + 0,1h_0/L_0} + \|\Delta u\|. \quad (6)$$

Авторами [7] были выявлены экспериментальные зависимости погрешности измерения координат центра и диаметра окружности от параметра  $h_0/L_0$ . Сплошными линиями на рис. 7 представлены результаты расчета по формуле (9) для трех значений погрешности исходных данных (координат точек контроля) = 0,001; 0,005; 0,010 мм. Точки на графиках 1, 2 – результаты имитационного моделирования процесса многократного измерения координат центра окружности по трем точкам для = 0,005; 0,010 мм. Точками графика 3 показаны погрешности измерений (рис. 7) радиуса эталонного кольца с номинальным радиусом  $R_{ном} = 13,5$  мм в секторах

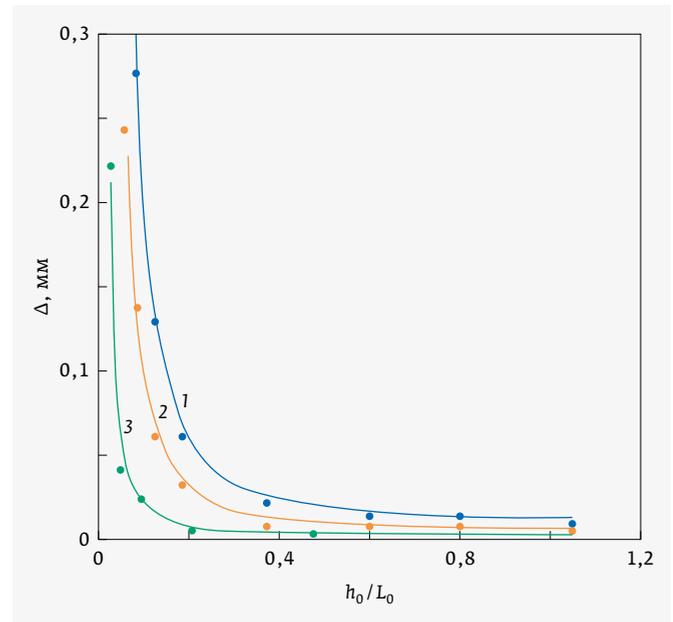


Рис. 7. Погрешность измерения координат центра и диаметра окружности [7]

окружности 6; 11; 22; 45; 90°. В каждом секторе было измерено шесть точек окружности. Измерения выполнены на высокоточной координатно-измерительной машине (КИМ) DKM1-30DP, имеющей пространственную погрешность  $\pm(2 + L/200)$  мкм.

\* \* \*

В результате проведенного обзора различных методов оценки возникновения погрешностей при измерении дефектов формы было выявлено существенное увеличение погрешности при округлениях значений. Простейший геометрический анализ показывает, что неустойчивость задач координатных измерений определяется параметрами геометрических элементов, имеющих признаки вырождения: отрезка прямой – в точку, дуги окружности и плоскости и т. д. [7]. Также рядом авторов подчеркивается необходимость более детального подхода к обозначению координатных измерений на чертежах, поскольку в настоящее время данные типы измерений ограничиваются рядом УГО, принятых в ГОСТ Р 53442-2015, в котором недостаточно объяснены такие значения, как теоретически точный размер (TED), ряд зависимых допусков (M, L, R), требование прилегания (E). В настоящее время роль координатных измерений еще больше возрастает.

В завершение приведем комментарий коллег из Нижегородского университета по поводу гибкости в сборке и применения зависимых допусков [8]: «Если условие зависимого допуска распространяется на базу, то это позволяет упростить конструкцию базирующих элементов

технологических приспособлений. Например, кондукторов и калибров. Их базирующие элементы могут быть выполнены не самоцентрирующимися, а жесткими, с постоянным размером, соответствующим пределу максимума материала базы. Смещение базы детали из-за зазора между ней и базирующим элементом приспособления или калибра, возникающее при отклонении размера базы от предела максимума материала, в данном случае разрешается зависимым допуском расположения».

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гущина Е. А., Епифанцев К. В., Ефремов Н. Ю.** Цифровая метрология: учеб.-метод. пособие. СПб: ГУАП, 2022. 104 с.
2. **Данилов М. Ф., Савельева А. А.** Анализ исходных данных неустойчивых задач координатных измерений геометрических параметров деталей // Измерительная техника. 2018. № 6. С. 41–45.
3. **Златкина О. Ю., Глухов В. И.** Повышение точности координатных измерений путем применения методологии двумерных измерений // В сб.: Метрология, стандартизация и управление качеством. Материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Главный редактор В. В. Шалай. 2018. С. 55–60.
4. **Леун Е. В., Сысоев В. К., Шалай В. В., Беловолов М. И., Курлов В. Н., Волков П. В., Шулепов А. В.** Гибридная 3D измерительная головка для высокоточных контактных и бесконтактных координатных измерений размеров изделий ракетно-космической промышленности // Контейнер. 2018. Т. 17. № 1. С. 134–144.
5. **Голыгин Н. Х., Чугреев И. Г., Хижняков И. А.** Метод калибровки мобильных координатных средств измерений в сферической системе координат // Геодезия и аэрофотосъемка. Приложение к журналу «Известия вузов». Сборник статей по итогам научно-технической конференции. 2018. № 9. С. 76–80.
6. **Балашов В. М., Драчев А. Н., Смирнов А. О.** Методы координатных измерений при контроле сложнопрофильной поверхности. В кн.: Метрологическое обеспечение инновационных технологий. Международный форум: тезисы. 2019. С. 41–43.
7. **Данилов М. Ф., Савельева А. А.** Оптимизация числа точек контроля при координатных измерениях характеристик формы, ориентации и месторасположения геометрических элементов изделий // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 29–34.
8. **Кайнова В. Н., Демьянович Е. М.** Роль термина «зависимый допуск», влияющего на снижение себестоимости и трудоемкости при изготовлении неотчетливых соединений // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 66–72.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

### ЭТАЛОНЫ И СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф.

*Издание осуществлено при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»*

В книге рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2018. – 402 с.,  
ISBN 978-5-94836-512-1

### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphere.ru](mailto:knigi@technosphere.ru), [sales@technosphere.ru](mailto:sales@technosphere.ru)