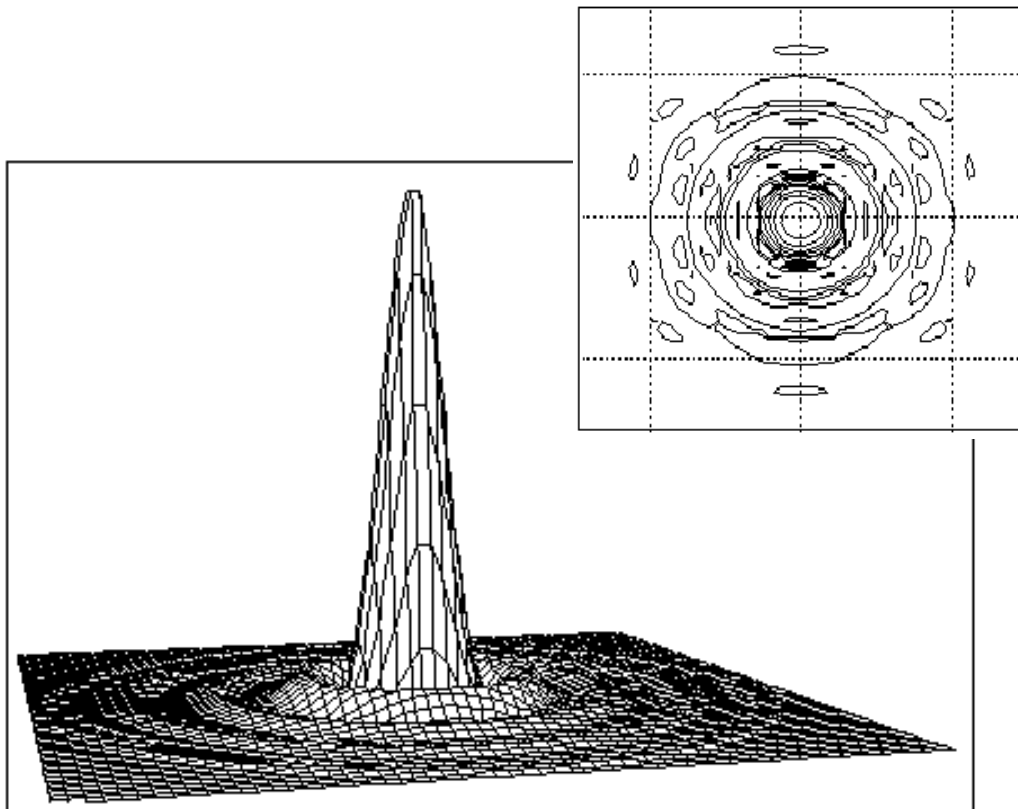


**В.К. Кирилловский  
Т.В. Точилина**

# **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 1. Введение и общие вопросы.  
Точность оптических измерений**



**Санкт-Петербург  
2017**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Университет ИТМО**

**В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина**

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность  
оптических измерений**

**Учебное пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2017**

**Кирилловский В.К., Точилина Т.В. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений. Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 49 с.**

Цель пособия – ознакомить студентов с теоретическими основами и методами оптических измерений как с позиций оптика-конструктора и исследователя, так и с общеметрологических позиций, связанных с задачами и спецификой оптических измерений. Пособие состоит из серии выпусков.

В части 1 рассматриваются необходимые основные понятия метрологии, классификация и погрешности классических методов оптических измерений, источники погрешностей, понятия о методах обработки данных и получении результата оптических измерений.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки для бакалавров 12.03.02 – Опотехника и для магистрантов 12.04.02 – Опотехника, а также может быть полезным для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием оптических систем, конструированием оптических приборов и для технологов оптического производства.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета лазерной и световой инженерии протокол № 10 от 11 октября 2016 г. и кафедрой Прикладной и компьютерной оптики протокол № 3 от 11 октября 2016 г.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2017  
© В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина, 2017

# 1. ВВЕДЕНИЕ. РОЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ЖИЗНИ

Улучшение качества промышленной продукции есть надежный путь более полного удовлетворения потребностей народного хозяйства, ускорения научно-технического прогресса. В связи с этим постоянно возрастают требования к соблюдению метрологических правил и норм, направленных на повышение уровня измерений, их точности, надежности и производительности. От точности и своевременности измерительной информации зависит правильность принимаемых решений. От качества измерений зависят современные технологии и научные исследования, учет и экономия материальных ресурсов, техническая, экологическая и медицинская диагностика, крупные научные открытия [1].

Наглядность получаемой информации является одним из наиболее ценных свойств многих оптических приборов. Невозможно представить себе работу космонавта, изучающего природные ресурсы Земли; или работу хирурга, сшивающего тончайшие кровеносные сосуды, без применения оптических приборов. Многие величайшие научные открытия были сделаны с помощью измерительных оптических приборов. Примером тому служит знаменитый «опыт Майкельсона», в котором с помощью изобретенного Майкельсоном интерферометра было установлено, что движение Земли не влияет на скорость распространения света. Этот результат навсегда останется в истории науки как замечательное достижение, так как он стал экспериментальной основой тех принципов, на которых Эйнштейн создал теорию относительности.

Создание оптического прибора невозможно без измерения и контроля его параметров как в процессе производства, так и после его окончательной сборки.

Современный оптический прибор содержит, как правило, кроме оптических деталей (линзы, призмы, зеркала, клинья, плоскопараллельные пластины) механические детали (оправы оптических деталей, корпус прибора, приводные механизмы). В связи с этим в процессе производства оптического прибора возникает необходимость в измерении и контроле как отдельных конструктивных параметров оптических деталей и узлов, так и оптического прибора в целом. Прежде чем изготовить линзу, входящую в фотообъектив, надо измерить показатель преломления и

дисперсию оптического стекла, из которого она должна быть изготовлена, а также проверить характеристики качества стекла (оптическую однородность, двойное лучепреломление, светопоглощение, бессвильность, пузырность). В дальнейшем надо будет измерять и контролировать толщину линзы, радиусы ее поверхностей и их качество, центрировку и правильность расположения линзы в объективе.

В современных условиях в большинстве практических применений оптимальность измерений определяется предельно достижимой точностью при минимальных затратах. Уровень точности определяется критерием целесообразности. Неоправданное превышение необходимой точности обычно резко удорожает измерения. Недостаточная точность приводит к браку в производстве, ошибочным результатам и решениям [2].

Технический прогресс отраслей промышленности и развитие науки требуют непрерывного повышения точности измерений физических величин. Для обеспечения единства этих измерений метрология должна непрерывно совершенствовать эталоны единиц и создавать все более точную измерительную аппаратуру, используемую как в качестве образцовых средств, так и при научных исследованиях. Поэтому задачей метрологии является также использование новейших достижений науки для создания средств измерений высшей точности. Средства измерений высшей точности применяются для получения значений универсальных физических констант, наиболее достоверные значения которых затем необходимы в технике точных измерений [3].

Современные оптические приборы играют важную роль в народном хозяйстве, служат основой научно-технического прогресса. Оптические и оптико-физические методы измерения и приборы, как наиболее точные, применяются во многих областях науки и производства – в большинстве современных высоких технологий, в ядерной и космической технике, лазерных технологиях, в машиностроении и приборостроении для контроля наиболее точных деталей, при сборке прецизионных узлов, для научных исследований в области физики, химии, медицины, биологии.

Оптические измерения – техническая наука, основным содержанием которой является измерение и контроль конструктивных параметров оптических элементов и систем, а также измерение физических характеристик изучаемых объектов с помощью

оптических методов и оптических приборов. Главная особенность оптических измерений заключается в том, что они имеют высокую точность и наглядность. Оптические измерения относятся к измерениям высшей точности, которая соизмерима с длиной световой волны ( $\lambda_{\text{ср}} = 0,555$  мкм). Поэтому, например, и в машиностроении, и в приборостроении оптические измерения применяются там, где необходимы предельно высокие точности. Так, концевые меры изготавливаются и аттестуются с применением интерферометрии, причем достигаемая точность находится на уровне  $\lambda_{\text{ср}}/20$ , так что погрешность не превышает 0,03 мкм [4].

С другой стороны, научные исследования, а также разработки в области высоких технологий требуют проведения измерений с наивысшими точностями, которые нередко находятся на пределе теоретически предсказанных возможностей.

Единство измерений и их требуемое качество контролируются и обеспечиваются государственными и ведомственными метрологическими службами.

В оптическом приборостроении производство современных оптических приборов, отвечающих требованиям высоких технологий, должно быть обеспечено высокоточными методами и аппаратурой оптических измерений и контроля. Современное оптическое приборостроение характеризуется увеличением объемов выпуска оптической продукции, совершенствованием ее технических характеристик, а также необходимостью создания и производства новых классов приборов и систем [5].

К оптике нового класса могут быть отнесены, например, оптические системы космических телескопов, высококачественные объективы исследовательских микроскопов, объективы оптических приборов для технологий микроэлектроники, оптические системы устройств записи и воспроизведения информации, оптические системы для лазерных технологий. Эти группы оптических систем могут соответствовать своему назначению, прежде всего, при условии достижения предельно высоких оптических характеристик качества изображения, когда волновой фронт, сформированный оптической системой, не имеет отклонений свыше нескольких сотых долей длины световой волны от формы, соответствующей идеальному качеству изображения (чаще всего – сферической). При этом по концентрации энергии изображение, построенное реальной оптической системой,

должно лишь на несколько процентов отличаться от идеального, т.е. предсказанного теорией дифракции.

Выполнение этих задач невозможно без совершенствования и развития методов и средств контроля и аттестации оптической продукции, применения высокоточных измерений параметров и характеристик оптических систем и их элементов; возможностями этих средств сейчас во многом определяется успешное развитие оптической промышленности и аппаратуры.

Значительную и все возрастающую роль играют оптические измерения также и в большинстве областей естественно-научных и научно-технических исследований, в технической, медицинской и биологической практике.

Успешная работа современного исследователя в оптической измерительной лаборатории зависит не только от хорошей оснащённости современными приборами, но и от знания и применения теоретических и технических аспектов современных оптических измерений, их возможностей и перспектив [6].

Дисциплина «Оптические измерения» относится к базисным дисциплинам содержания образовательных программ по направлению подготовки «Оптотехника». Цель изучения дисциплины – освоение обучающимися теоретических, практических и метрологических основ классических и современных оптических измерений.

## **1.1. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ МЕТРОЛОГИЕЙ И НАУКОЙ О ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

В познании материального мира важную роль играют количественные оценки, позволяющие раскрывать действующие в природе закономерности, учитывать ресурсы, определять качественные стороны явлений, производимой продукции и других сторон человеческой деятельности.

В обиходном смысле различного рода оценивание (например, оценивание знаний учащихся в баллах и т.д.) часто относят к измерениям. Однако в научно-техническом смысле к измерениям предъявляются строго определенные требования [7].

### **Измерение**

*Измерением* называется совокупность операций по нахождению количественного значения физической величины опытным путем,

закключающихся в сравнении измеряемой величины с ее единицей с помощью технического средства, хранящего единицу физической величины.

*Физическая величина* – это характеристика объекта, качественно общая для данной группы объектов, но количественно индивидуальная для каждого объекта.

Физическая величина выражается с использованием шкалы соотношений, которая имеет ряд отметок (делений), количественно определяющих свойства или состояния измеряемых объектов, и нулевую отметку.

*Размер величины* – количественное содержание в данном объекте свойства или состояния, соответствующего понятию данной физической величины.

*Значение величины* – это оценка данной физической величины через некоторое число принятых единиц этой физической величины [8].

*Результат измерения* обычно содержит числовое значение измеряемой физической величины. Наряду с величиной, предметами измерения могут стать параметр, коэффициент и характеристика.

*Параметр* – величина, характеризующая какое-либо свойство или состояние процесса, явления, объекта или устройства.

*Коэффициент* – величина, характеризующая отношение параметров.

*Характеристика* – функциональная зависимость, описывающая количественные признаки данного предмета или явления.

Изучение и оптимизация измерений являются предметами науки метрологии.

## **Метрология**

*Метрология* – это область технической физики, являющаяся научной основой измерительной техники.

Задачи метрологии:

- обеспечение единства и правильности измерения физических величин;
- оценка достоверности результатов измерения;
- разработка новых методов и средств измерений;
- определение значений универсальных физических констант.



## **Единство измерений**

*Единством измерений* называют такое состояние измерений, при котором:

- их результаты выражены в узаконенных единицах;
- погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Единицей физической величины служит физическая величина фиксированного размера, условно принятая для сравнения с ней однородных величин, которой присвоено числовое значение, равное 1 (единице).

Единство измерений обеспечивается унификацией единиц физических величин. В нашей стране действует международная система единиц СИ, на основе которой введен ГОСТ 8.417-2002.

Правильный размер каждой единицы определяется соответствующим государственным *эталон*ом, воспроизводящим данную единицу физической величины с наивысшей точностью и передающим единицу рабочим средствам измерений через систему образцовых средств измерений.

## **Метрологическая суть измерения**

*Метрологическая суть измерения* состоит в сравнении (в явном или неявном виде) измеряемой физической величины с ее единицей, хранимой применяемым средством измерения; размер единицы физической величины передан средству измерения от нормативно утвержденного эталона или образцового средства измерения.

## **Цель измерения**

*Цель измерения* состоит в определении значения измеряемой величины с известной погрешностью.

## **Оценивание**

*Оценивание* обычно отличается от измерения в строгом смысле отсутствием технического средства, хранящего единицу измеряемой величины (связанную с эталоном), и неопределенностью в оценке погрешности полученного значения оцениваемой величины.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для выполнения измерения необходимо иметь:

- метод измерения,
- средство измерений,
- методику измерения.

### Метод измерения

*Методом измерения* называют совокупность приемов использования принципов и средств измерения.

### Принцип измерения

Под *принципом измерения* понимается научная основа измерения, т.е. комплекс знаний о совокупности физических явлений и технических достижений, на которых основаны данные измерения.

### Средства измерения

*Средствами измерения* являются измерительные установки, включающие функционально объединенные измерительные меры, приборы и измерительные преобразователи.

### Методика измерений

*Методикой измерений* называют установленную совокупность операций, условий и правил, выполнение которых при измерении обеспечивает получение результатов измерений согласно данному методу.

### Условия измерения

Правила применения средств измерений, при соблюдении которых величины, влияющие на точность и выполнимость измерений, находятся в допустимых пределах.

## 2.1. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

*Оптические методы измерений* основаны на использовании оптических средств извлечения измерительной информации об исследуемом объекте, или, иначе говоря, на использовании оптического сигнала для кодирования измерительной информации.

Так, в измерительном микроскопе информация о геометрических координатах измеряемого объекта содержит распределение освещенности в оптическом изображении объекта. Интерферометр позволяет судить о малых деформациях отполированной поверхности по изменениям формы (фазовой структуры) исследуемого волнового фронта оптического излучения, которые преобразуются интерферометром в изменения конфигурации интерференционных полос, зависящие от распределения освещенности в интерференционной картине.

Как необходимые признаки измерения могут быть названы:

- принцип метода и его теоретические основы, указывающие на возможности и принципиальные ограничения метода;
- математический аппарат для получения результата измерения, включающего значения измеряемой величины и погрешности ее определения;
- сведения об объекте измерения, его математическое и физическое описание (модель);
- функциональная схема измерительной установки, требования к ее характеристикам и параметрам ее элементов;
- требования к условиям проведения измерения;
- методика измерения, включающая указания по установке объекта, настройке установки, выполнению измерительных наблюдений и считыванию данных, их обработке и получению результата измерения.

Известные многочисленные методы оптических измерений подразделяются на прямые и косвенные.

### **Прямое измерение**

Измерение, проводимое *прямым методом*, при котором искомое значение физической величины получают непосредственно из данных измерительного эксперимента. Прямые измерения позволяют непосредственно получить искомое значение физической величины.

Формально без учета погрешности измерения они могут быть описаны выражением

$$Q = X,$$

где  $Q$  – измеряемая величина;  $X$  – результат измерения.

**Пример.** Метод измерения радиусов кривизны сферической оптической поверхности с помощью автоколлимационного микроскопа (рис. 1) [9].

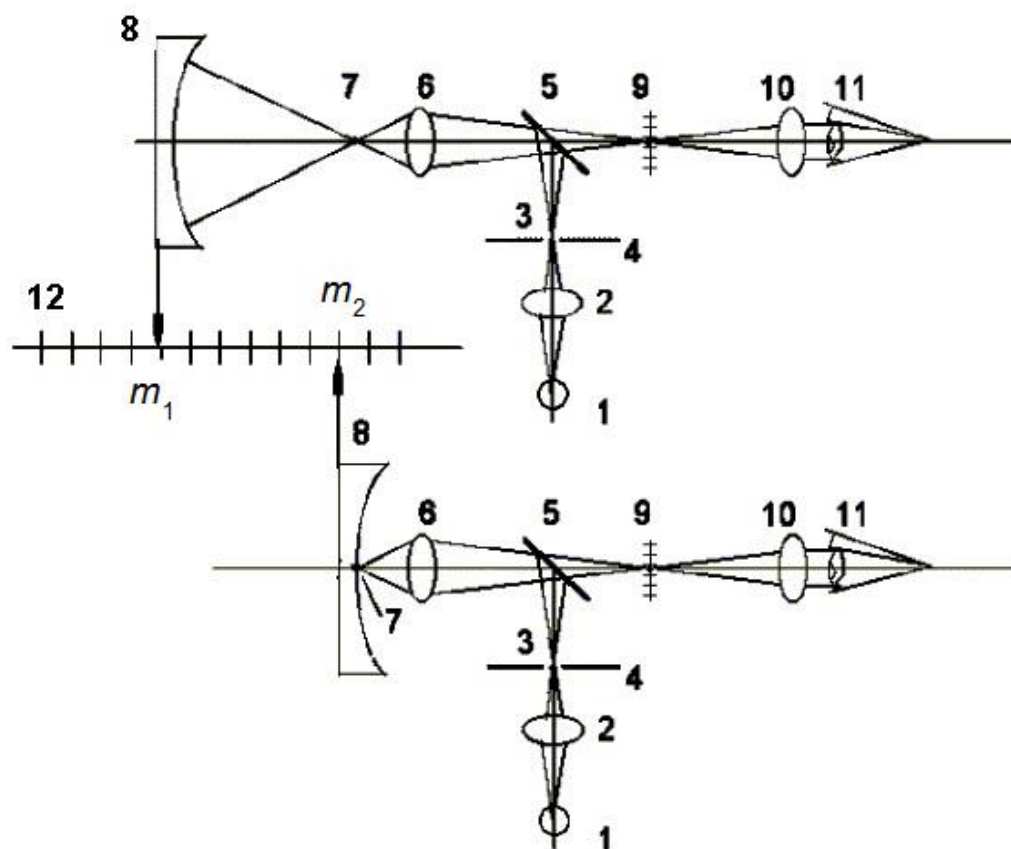


Рис. 1. Измерение радиуса кривизны сферической оптической поверхности с помощью автоколлимационного микроскопа:  
 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – тест-объект; 4 – точечная диафрагма;  
 5 – светоделитель; 6 – объектив автоколлимационного микроскопа;  
 7 – рабочая точка автоколлимационного микроскопа; 8 – деталь с измеряемой сферической поверхностью; 9 – автоколлимационное изображение тест-объекта; 10 – окуляр; 11 – приемник изображения (глаз); 12 – отсчетное устройство для определения координат взаимного расположения детали и микроскопа)

Для определения радиуса кривизны наводят автоколлимационный микроскоп последовательно на центр кривизны измеряемой оптической поверхности, а затем на вершину этой поверхности. Для этого совмещают рабочую точку 7 автоколлимационного микроскопа с центром кривизны, получая отсчет продольного положения микроскопа  $m_1$ , а затем с точкой на вершине поверхности, получая отсчет продольного положения микроскопа  $m_2$ . Величину радиуса кривизны определяют, пользуясь выражением:

$$R = m_2 - m_1.$$

Основное достоинство прямых методов – их простота.

### Косвенное измерение

При *косвенном измерении* искомое значение физической величины определяют на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной определенной математической зависимостью. Числовое значение искомой величины находится путем расчета после подстановки в формулу найденных величин  $Q=F(X, Y, Z, \dots)$ , где  $X, Y, Z, \dots$  – результаты прямых измерений.

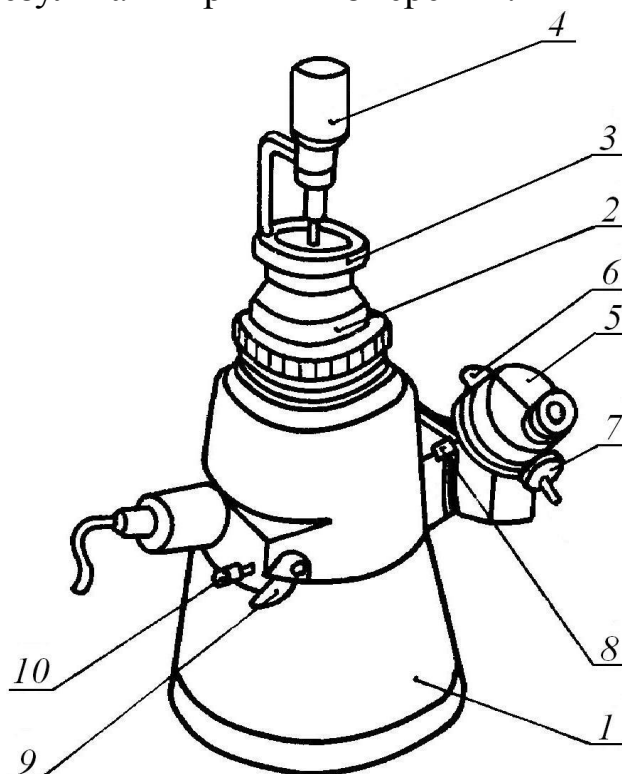


Рис. 2. Внешний вид сферометра ИЗС-7: 1 – литой чугунный корпус; 2 – площадка, на которую помещают опорные кольца; 3 – измеряемая деталь; 4 – упор; 5 – спиральный окулярный микрометр; 6, 8, 10 – винт; 7 – маховичок; 9 – рычаг-арретир

Итак, косвенные измерения позволяют определить искомую величину путем вычислений по известным формулам, в которые входят результаты прямых измерений.

**Пример.** Метод измерения радиусов кривизны сферической оптической поверхности с помощью кольцевого сферометра (рис. 2 и 3) [10].

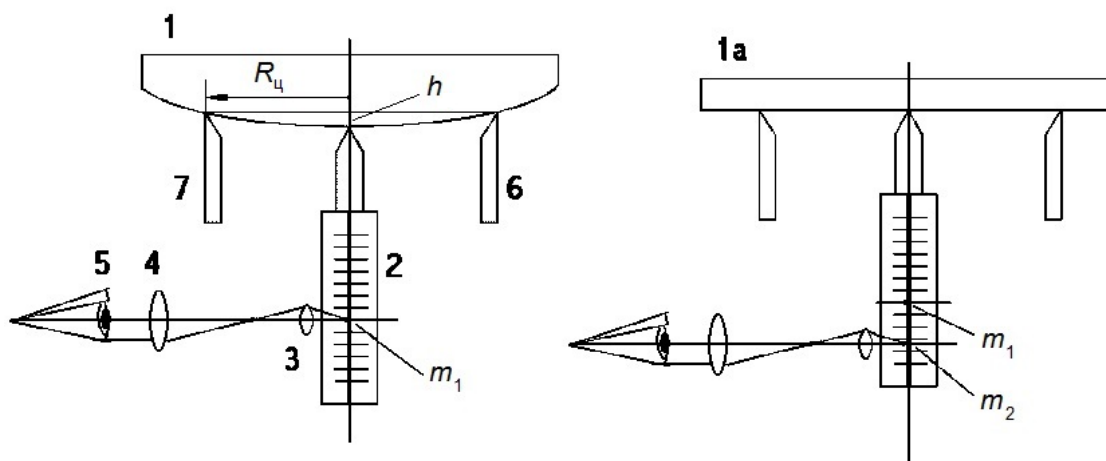


Рис. 3. Принцип измерения радиуса кривизны при помощи кольцевого сферометра: 1 – измеряемая деталь со сферической поверхностью; 1а – деталь с плоской поверхностью; 2 – измерительный стержень сферометра с оптической шкалой; 3, 4 – объектив и окуляр отсчетного микроскопа; 5 – глаз наблюдателя; 6, 7 – опорное кольцо

На опорное кольцо устанавливают поочередно опорную плоскую оптическую поверхность (деталь 1а), а затем измеряемую сферическую деталь (деталь 1). Для определения радиуса кривизны измеряют стрелку прогиба  $h$  сферической поверхности, установленной на опорное кольцо, как разность отсчетов  $m_1$  и  $m_2$ :

$$h = m_2 - m_1.$$

Искомый радиус кривизны вычисляют по формуле:

$$r = \frac{R_{\text{ц}}^2}{2h} + \frac{h}{2} = \frac{(R_{\text{ц}}^2 + h^2)}{2h},$$

где  $R_{\text{ц}}$  – радиус применяемого опорного кольца.

Косвенные методы применяются в тех случаях, когда прямые измерения эксплуатационно нецелесообразны или недостаточно точны. В практике оптических измерений косвенные измерения встречаются гораздо чаще, чем прямые. Погрешности могут возникать из-за неточности формул, применяемых для расчета.

## 2.2. СОВОКУПНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Одни и те же величины измеряют прямым или косвенным методом несколько раз, при этом от одного измерения к другому меняют сочетание измеряемых величин. Искомые значения величин находят решением системы уравнений, связывающих измеренные и

искомые величины. Совокупные измерения позволяют, при необходимости, обойтись без аттестованного эталона. Например – абсолютные методы измерения ошибок оптических поверхностей, когда три пробных стекла последовательно накладывают друг на друга в разных сочетаниях [11].

**Пример.** Три пробных стекла (1, 2, 3) на рис. 4 последовательно накладывают друг на друга в разных сочетаниях (а, б, в), и по возникающей интерференционной картине оценивают их относительные ошибки в числе  $N$  интерференционных колец. Затем составляют систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= x_1 + x_2, \\ N_2 &= x_1 + x_3, \\ N_3 &= x_2 + x_3, \end{aligned} \right\}$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – искомые абсолютные ошибки поверхностей.

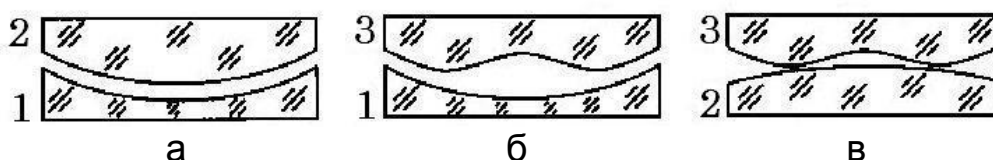


Рис. 4. Абсолютный метод измерения трех плоских пробных стекол

Итак, совокупные измерения состоят в том, что искомую величину находят решением системы уравнений, составленных по результатам ряда прямых или косвенных измерений величин при различающихся условиях.

Существует ряд разновидностей прямых измерений: метод непосредственной оценки, дифференциальный метод, нулевой метод и метод совпадений.

### Метод непосредственной оценки

Этот метод состоит в прямом измерении всей искомой величины, значение которой определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия. Метод наиболее простой и распространенный. Например, при измерении толщины концевых мер на оптическом контактном длинномере (рис. 5) сначала берут нулевой отсчет  $m_0$ , опустив измерительный стержень на плоскость столика.

Затем на столик устанавливают образец, опускают измерительный стержень и берут соответствующий отсчет  $m_s$ . Измеренную толщину определяют по формуле  $h_s = m_s - m_0$ .

Основные источники погрешностей: неточность нанесения шкал, непостоянство условий измерения (например, связанное с колебаниями температуры).

Более развитыми являются методы сравнения, основанные на использовании меры или измерительного прибора сравнения (компаратора). К методам сравнения относят методы: дифференциальный и нулевой.

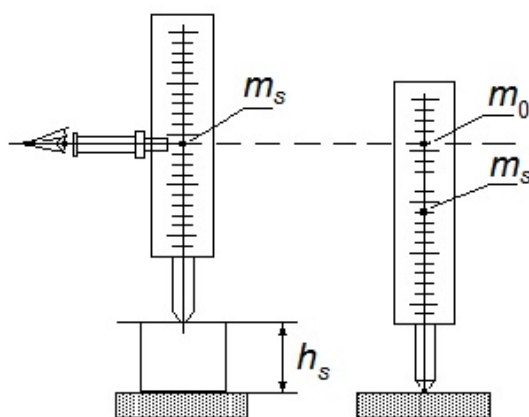


Рис. 5. Схема метода непосредственной оценки

### Дифференциальный метод

Метод сравнения, основанный на регистрации измерительного сигнала, являющегося разностью измерительных сигналов, поступающих от исследуемого объекта, и меры, хранящей известное значение измеряемой величины. Итак, в дифференциальном методе непосредственно измеряется не сама искомая величина  $h_s$ , а ее отступление  $\pm\Delta h$  от величины  $h_k$ , известной с высокой точностью. Пример – измерение длины  $h_s$  на длинномере (рис. 6), когда первый отсчет берется не от нуля, а по концевой мере номинального размера  $h_k$ :  $h_s = h_k + \Delta h$ .

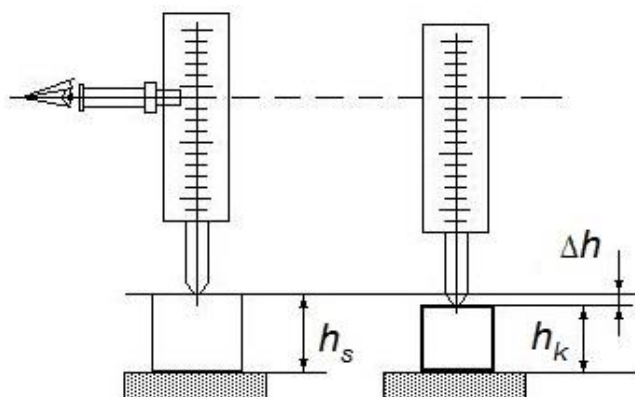


Рис. 6. Схема дифференциального метода измерения



Повышение точности достигается благодаря уменьшению пределов измерения, причем уменьшается влияние погрешностей нанесения измерительных шкал и температурных колебаний.

### Совместные измерения

Величины измеряют несколько раз, при этом от одного измерения к другому меняют условия измерения.

Искомые значения величин находят также решением системы уравнений, связывающих измеренные и искомые величины. Например – измерение толщины трех концевых мер на контактном длинномере.

**Пример.** Измеряется толщина трех концевых мер на длинномере (рис. 7).

Первым получают нулевой отсчет  $m_0$ , опустив измерительный стержень на плоскость столика. Затем на столик прибора последовательно устанавливают образцы, опускают измерительный стержень и берут соответствующие отсчеты  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$ , а затем соединяют оптическим контактом и помещают на столик все образцы сразу (один на другой) и берут отсчет  $m_4$ .

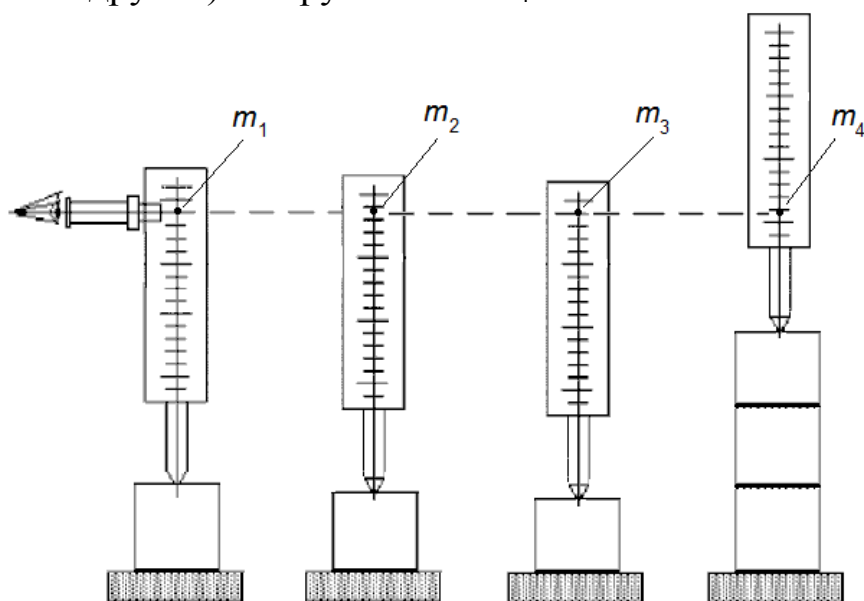


Рис. 7. Совместные измерения

Толщины  $h_1$ ,  $h_2$  и  $h_3$  концевых мер в этом случае рассчитываются по формулам:

$$h_1 = [m_1 + (m_4 - m_2 - m_3)]/2,$$

$$h_2 = [m_2 + (m_4 - m_1 - m_3)]/2,$$

$$h_3 = [m_3 + (m_4 - m_1 - m_2)]/2.$$

Здесь каждый размер входит в формулу дважды (второй раз – в отсчете  $m_4$ ), поэтому в знаменателе присутствует цифра 2. Средняя квадратическая погрешность  $\sigma^2$  для метода непосредственной оценки при измерении на длинномере составит (рис. 5):

$$\sigma^2(h) = \sigma^2(m_1 - m_0).$$

Считая среднюю квадратическую погрешность для отсчетов  $m_1$  и  $m_0$  одинаковой и равной  $\sigma(m)$ , можем записать:

$$\sigma^2(h) = 2\sigma^2(m).$$

При совокупном измерении можно принять, например:

$$\sigma^2(h) = \sigma^2 [(m_2 + m_4 - m_1 - m_3)/2] = 4\sigma^2(m)/4 = \sigma^2(m).$$

Точность измерения улучшается вдвое за счет выполнения четырех отсчетов вместо двух применительно к измерению каждого образца.

### Нулевой метод

*Нулевой метод* (или метод противопоставления) состоит в том, что эффект действия измеряемой величины уравнивается эффектом действия известной величины (меры) так, что их взаимное действие сводится к нулю. Сюда относятся компенсационные методы. Повышение точности достигается благодаря возможности фиксации нулевого положения прибора с высокой точностью.

**Пример** – измерение углов клиньев на коллиматорной установке компенсационным методом (рис. 8). Здесь компенсатор, обеспечивающий плавную регулировку и отсчет угла вводимого компенсационного клина, устанавливается, перекрывая половину параллельного пучка лучей от коллиматора к зрительной трубе (рис. 8, а). Вторую половину перекрывает измеряемый клин. Бипризма обеспечивает одновременное наблюдение в двух половинах поля зрения (рис. 8, б) делений сетки, которые совмещаются, когда действие компенсатора уравнивается с действием измеряемого клина.

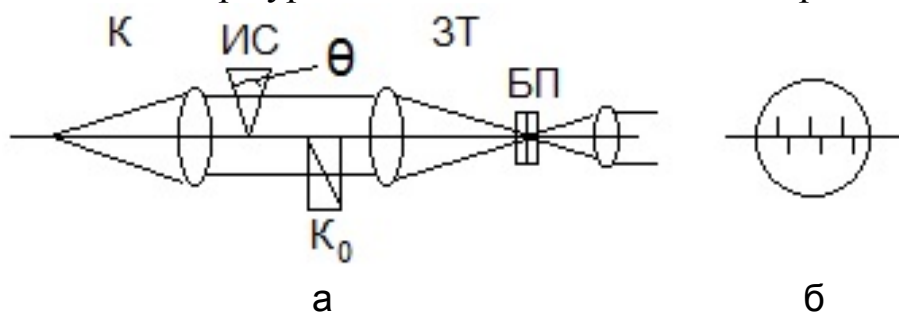


Рис. 8. Установка для измерения углов оптических клиньев:  
 К – коллиматор; ЗТ – зрительная труба;  $K_0$  – компенсатор;  
 БП – бипризма; ИС – испытуемый клин;  $\theta$  – угол клина

## Метод совпадений

Метод основан на сопоставлении двух периодических сигналов близкой частоты (верньеры, нониусы, муар-микрометры, стробоскопы).

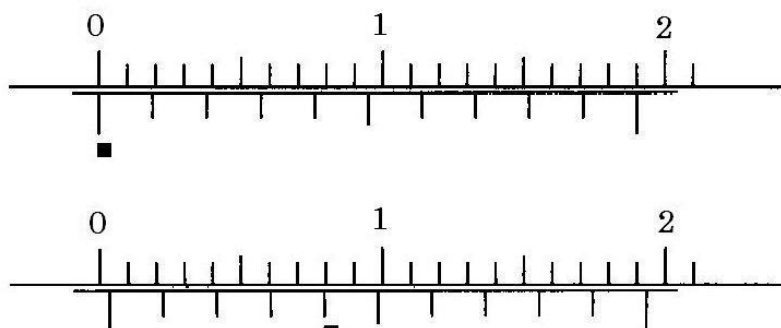


Рис. 9. Нониус

При отсчете по верньеру (или нониусу) десятые доли деления шкалы определяются по порядковому номеру верньерного штриха, совпадающего с каким-либо штрихом шкалы.

Коэффициент повышения точности  $M$  определяется отношением числа делений нониуса (рис. 9) к приращению числа делений:

$$M = \frac{N_H}{N_H - N_{Ш}},$$

где  $N_H$  – число делений нониуса (или верньера);  $N_{Ш}$  – соответствующее ему число делений шкалы.

В оптических измерениях геометрических параметров применяются также контактные и бесконтактные методы. Например, толщина линзы может быть измерена контактным методом при помощи оптиметра либо бесконтактным методом при помощи толщиномера на основе автоколлимационного микроскопа. К достоинствам контактного метода можно отнести простоту, экономичность и высокую производительность. К основным недостаткам относится опасность повреждения измеряемой оптической поверхности. Этот недостаток преодолевается применением бесконтактного метода.

## Правильность измерений

*Правильность измерений* означает проведение измерительного эксперимента так, чтобы систематические погрешности при измерении были минимальными; это условие достигается выбором соответствующего метода и средства измерения. Обычно применительно к конкретной измерительной задаче правильным

считается тот результат измерения, погрешность которого не превышает установленного значения.

### **Достоверность измерения**

*Достоверность измерения* характеризует степень доверия, которого она заслуживает, и определяется оценочным значением границы случайной погрешности для заданной вероятности с применением положений математической статистики.

### **Повторяемость измерений**

*Повторяемость* или сходимость измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость между результатами измерения одной и той же величины, полученных повторно одними и теми же средствами, одинаковым методом в одинаковых условиях. Сходимость двух групп многократных измерений характеризуют размахом, средней арифметической или средней квадратической погрешностью.

### **Воспроизводимость результатов измерений**

*Воспроизводимость* – это характеристика качества измерений, отражающая близость между результатами измерения одной и той же величины, полученных в разных местах, разными исполнителями, методами и средствами. Воспроизводимость измерений характеризуют средней квадратической погрешностью сравниваемых групп измерений.

### **Измерительное наблюдение**

*Измерительным наблюдением* называют определение отдельных значений физической величины. *Измерением* называют совокупность нескольких измерительных наблюдений одной и той же величины с последующим определением результата измерения путем обработки совокупности результатов наблюдений.

## **2.3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. ЭТАЛОНЫ. ОБРАЗЦОВЫЕ И РАБОЧИЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ**

Для обеспечения единства измерений требуется тождественность единиц, в которых проградуированы все средства измерений одной и той же физической величины, что достигается путем: точного

воспроизведения и хранения единиц физических величин; передачи их размеров рабочим средствам измерения.

По метрологическому назначению средства измерения делятся на эталоны, образцовые и рабочие средства измерения.

### **Средство измерений**

*Средство измерений* – это техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее или хранящее одну или несколько единиц физических величин, размеры которых принимаются неизменными в течение известного промежутка времени.

### **Эталон**

*Эталон* называют средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы измерения физической величины для передачи другим средствам измерений и официально утвержденное в качестве эталона.

### **Образцовые средства измерений**

*Образцовые средства измерений* – это меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, предназначенные для поверки и градуировки по ним других средств измерений и официально утвержденные в качестве образцовых.

### **Рабочие средства измерений**

*Рабочие средства измерений* применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц другим средствам измерений.

Примеры эталонов физических единиц (в системе СИ) [12].

Единица длины – метр: расстояние, проходимое светом за  $1/299\,292\,458$  долей секунды.

Единица силы света – кандела: сила света в заданном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение, частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила излучения которого в этом направлении составляет  $1/683$  Вт/ср.

### **Измерительный прибор**

*Измерительный прибор* – это средство измерений, предназначенное для получения значений измеряемой величины в

установленном диапазоне, имеющее нормированные метрологические характеристики. Имеет устройства преобразования величины в сигнал и устройства индикации.

### **Поверенный измерительный прибор**

*Поверенным* считается прибор, прошедший государственную или ведомственную поверку; результатом поверки является определение и занесение в паспорт прибора основной и дополнительной погрешности прибора.

### **Измерительный преобразователь**

*Измерительным преобразователем* называют техническое средство с нормированными метрологическими характеристиками, преобразующее измеряемую величину в другую величину или в сигнал измерительной информации. Входит в состав средства измерения.

### **Измерительная установка**

*Измерительной установкой* называется совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенных для измерений одной или нескольких физических величин, и расположенная в одном месте. При включении в нее образцовых средств измерений измерительная установка превращается в поверочную установку.

Измерительная установка состоит из отдельных узлов, измерительных преобразователей и измерительных приборов. Как правило, измерительная установка не поверяется и, следовательно, для нее не указывается основная и дополнительная погрешность в единицах искомой величины. Известными могут быть погрешности отдельных узлов (параметров) установки в единицах соответствующих параметров. При анализе систематической погрешности измерительной установки учитываются только погрешности параметров, входящих в формулу для расчета искомой величины по непосредственно измеренной величине, т.е. в уравнение для косвенного измерения.

### 3. ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

#### Характеристики метода измерения – погрешность и диапазон

Применяются следующие численные критерии для оценки качества измерения и сравнения различных методов и средств измерений.

#### Точность результата измерения

*Точность* – это характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности его результата.

#### Погрешность измерения

*Погрешность* – это интервал, в который с заданной вероятностью попадает отступление измеренного значения данного параметра от его истинной величины. Учитываются погрешности средств измерений, методические погрешности и результаты измерительных наблюдений.

При создании измерительной установки важно теоретически оценить ее точностные характеристики, предварительно рассчитав все известные составляющие погрешности данного измерения. Погрешность в общем случае представляется в виде

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_n + \Delta_y + \Delta_b + \Delta_l,$$

где  $\Delta_m$  – методическая;  $\Delta_n$  – инструментальная;  $\Delta_y$  – установочная;  $\Delta_b$  – вычислительная;  $\Delta_l$  – личная.

Качество измерений принято также характеризовать *абсолютной* и *относительной* погрешностями. Под абсолютной погрешностью понимают разность  $\Delta X = X - X_0$ , где  $X$  – измеренная величина;  $X_0$  – ее истинное значение.

Относительная погрешность:

$$\Delta X_{\text{отн}} = \frac{\Delta X}{X_0} 100\% .$$

При определении абсолютной и относительной погрешностей чаще всего в качестве истинного значения  $X_0$  принимают среднее арифметическое из ряда измерений, т.е. полагают  $X_0 = X_{\text{ср}}$ .

#### Диапазон измерения

*Диапазон измерения* – это интервал значений измеряемого параметра, в пределах которого возможно проведение измерений без превышения предписанной погрешности. Сравнивая методы

измерения данного параметра, при прочих равных условиях отдают предпочтение методу, который обеспечивает больший диапазон измерения.

Исходя из диапазона измерения, который обеспечивает данный прибор, определяется его информативность  $I = L/\sigma$  (бит), где  $L$  – диапазон измерения,  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) случайной погрешности измерения.

Итак, большее количество информации дает прибор с большим диапазоном измерения и меньшим значением случайной погрешности.

Важными качествами метода и средства измерения являются надежность, оперативность (экспрессность), стабильность, повторяемость и воспроизводимость результатов, простота и экономические характеристики.

### **3.1. ТИПЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Погрешность результата измерения включает в себя методические и инструментальные погрешности.

#### **Методические погрешности**

*Методическими* называют погрешности от неточности математической модели принципа измерения, что влечет за собой неточность соотношений, применяемых при обработке результатов измерительных наблюдений.

#### **Инструментальные погрешности**

*Инструментальные погрешности* обусловлены несовершенством средств измерения и влиянием изменяющихся условий измерения. К этой группе относятся следующие погрешности:

- погрешности изготовления измерительных шкал и других узлов прибора,
- погрешности юстировки и настройки установки,
- погрешности работы источника излучения и приемника оптического сигнала,
- погрешности измерительных наводок и отсчетов.



### 3.2. ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ ИЗМЕРЕНИИ

*Измерение* – это физический эксперимент, точность которого, в конечном итоге, всегда ограничена. Поэтому результат измерения является, строго говоря, приближенным значением, более или менее отличающимся от истинного значения измеряемой величины.

В процессе измерения участвуют объект и прибор. На результат измерения влияют внешние условия, при которых производятся измерения. Каждый из этих факторов вносит ошибки в результат измерения.

#### Источники погрешностей, связанные с объектом

а) *Шероховатость поверхностей.* Например, микронеровности на поверхности в случае недостаточной чистоты обработки создают неопределенность при измерении геометрических параметров объекта, в частности – его длины (рис. 10). Величина микронеровностей должна быть меньше допустимой погрешности измерения. С высокой точностью можно измерить расстояние только между полированными поверхностями.

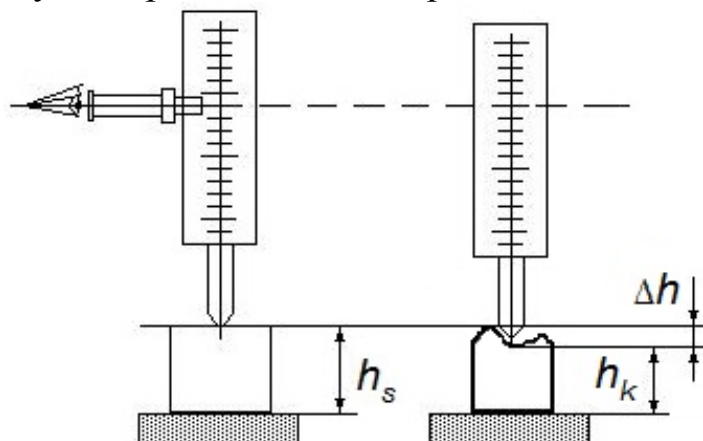


Рис. 10. Влияние шероховатости измеряемой поверхности

б) *Качество изготовления поверхностей.* Например, при точном измерении угла призмы требуется высокая точность изготовления примыкающих к нему граней, так как при сферичности граней возникает неопределенность в процессе измерения угла (рис. 11), и эта неопределенность не должна превышать допустимой погрешности измерения.

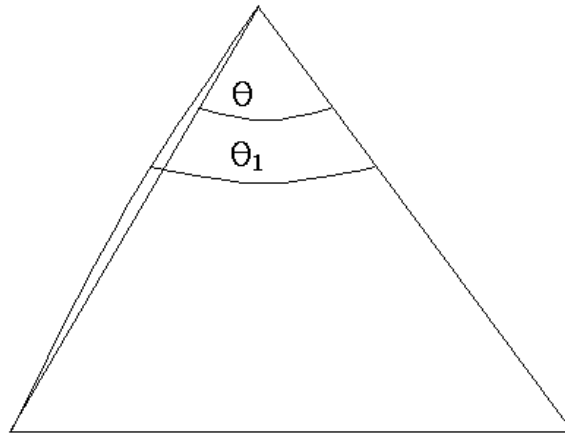
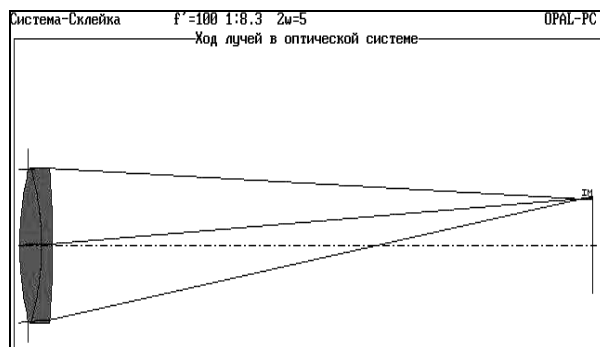


Рис. 11. Ошибка поверхности вносит неопределенность в размер угла призмы

- в) *Размер детали.* В разных случаях на точность влияют те или иные размеры измеряемого оптического элемента или детали. Например, при измерении углов призмы точность метода повышается при увеличении размера граней в главном сечении, так как при этом усредняются погрешности, вносимые местными ошибками поверхностей граней призмы.
- г) *Неоднородность материала оптической детали,* если измерение выполняется в проходящем свете. Неоднородность дает дополнительные деформации волнового фронта, проходящего сквозь деталь, что ведет к снижению качества измерительного изображения и может привести к его смещению; тот и другой фактор вызывают появление погрешностей.
- д) *Степень коррекции aberrаций измеряемого оптического элемента.* Оптическая система или деталь при измерении должны находиться в положении наименьших aberrаций (оно обычно совпадает с расчетным положением измеряемого элемента в той системе, где он должен работать). Например, объектив зрительной трубы, состоящий из двух линз, рассчитывается на минимум aberrаций для следующего рабочего положения: предмет – со стороны положительной линзы на бесконечности, изображение – со стороны отрицательной линзы в фокусе объектива (рис. 12). Если перевернуть объектив отрицательной линзой к бесконечно удаленному предмету (рис. 13), то, вследствие aberrаций, лучи, прошедшие через разные зоны объектива, будут пересекаться в разных точках.

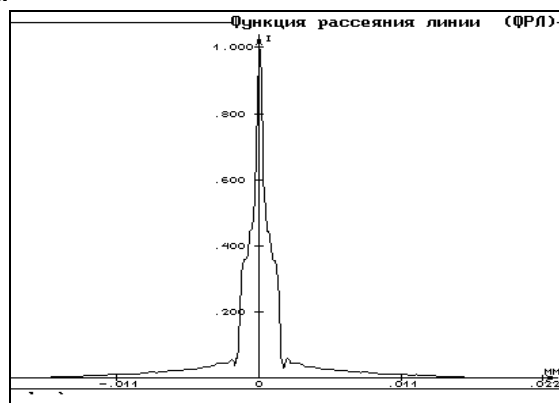
Измерение фокусного расстояния в таком положении будет неточным из-за неопределенности измеряемой величины (рис. 13, а).



а

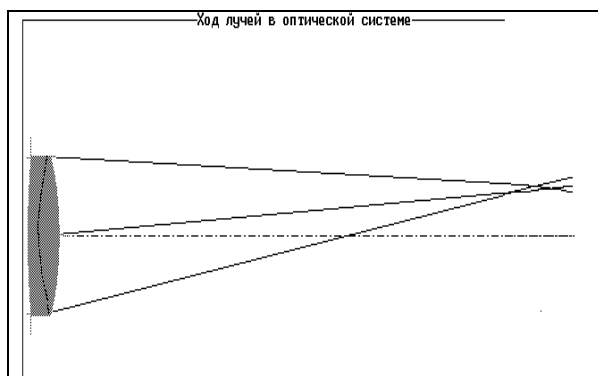


б

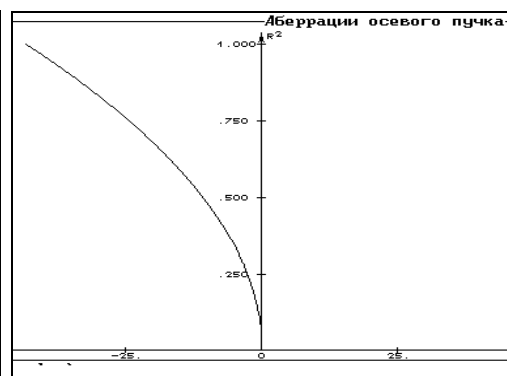


в

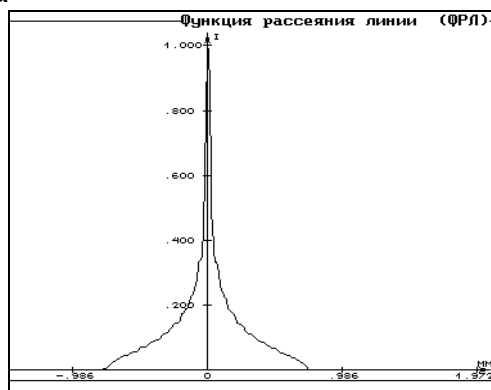
Рис. 12. Аберрации и качество изображения объектива зрительной трубы в расчетном положении



а



б



в

Рис. 13. Аберрации и качество изображения объектива зрительной трубы в перевернутом положении

### Источники ошибок измерений, связанные с прибором

- а) *Ошибки, вызванные ограниченной чувствительностью метода, применяемого в приборе.* Например, двухлучевая интерференция (рис. 14, а) дает точность совмещения штриха измерительного перекрестия с интерференционной полосой в 0,1 полосы, а обработанная интерферограмма (рис. 14, б, в) или многолучевая интерференция – 0,01 полосы.

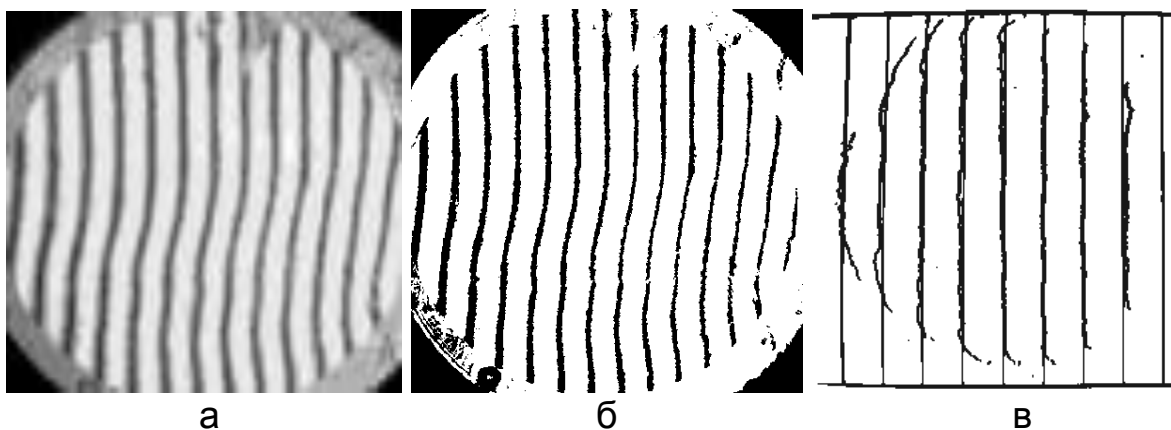


Рис. 14. Обработка интерферограммы

- б) *Теоретические ошибки прибора.* Они могут возникнуть, когда в основу кинематической схемы прибора или отсчетного устройства заложена не точная, а приближенная формула, или приближенная формула используется при обработке результатов косвенного измерения. Теоретическая ошибка должна быть меньше допустимой погрешности измерения.
- в) *Инструментальные ошибки прибора.* Это ошибки оптической и кинематической схем прибора, изготовления эталонов, градуировки шкал, установки нуля, ориентировки прибора в пространстве, установки детали в рабочее положение. Вследствие этих ошибок точность прибора всегда ниже точности метода. Уменьшение ошибок достигается выбором рациональной конструкции прибора и оптимальной технологии его изготовления.
- г) *Ошибки, зависящие от приемника изображения (или приемника излучения) и системы анализа измерительной информации.* В качестве приемников могут быть использованы глаз, фотоэлектрическое устройство, фотоматериал, телевизионная (видео) камера, электронно-оптические преобразователи и другие устройства. Приборные приемники излучения работают или с отсчетным устройством (фотоэлектрические), или создают

изображение объектов, которое затем рассматривается и анализируется визуально. Они применяются при измерениях в невидимых областях спектра, при малых световых потоках, а также при автоматизации контрольных операций, в том числе для ввода оптического измерительного изображения в компьютер.

### **Источники погрешностей от приемников излучения**

Приемники излучения характеризуются чувствительностью. Для электронно-оптических преобразователей (ЭОП), фотоэлектрических и телевизионных приемников чувствительность характеризуют отношением силы возникающего фототока и падающего светового потока; для фотослоя – зависимостью плотности почернения  $D$  от логарифма экспозиции, причем экспозиция  $H$  определяется как

$$H = Et,$$

где  $E$  – освещенность, создаваемая элементом оптического изображения на участке светочувствительного слоя;  $t$  – время действия данной освещенности – время экспозиции.

Указанная зависимость выражается световой характеристикой фотоматериала (график которой – характеристическая кривая, рис. 15):

$$D = f(\lg H).$$

Чувствительность зависит от длины волны излучения. Каждый приемник работает в определенной зоне длин волн. Порог чувствительности – наименьшая яркость или освещенность объекта, на которую реагирует приемник. Недостаточная чувствительность приемника создает неблагоприятные условия, при которых оптический сигнал регистрируется на нелинейном (начальном) участке световой характеристики в условиях снижения контраста. Здесь к тому же резко снижается отношение сигнала к шуму (для фотоматериала – это шум фотографической зернистости). И то, и другое вызывает повышение погрешностей измерений.

Фотоэлектрические приемники излучения могут обладать инерционностью, характеризуемой временем между облучением и появлением тока в цепи или между исчезновением объекта и его изображением. При восприятии модулированных световых сигналов чувствительность зависит также и от частоты модуляции.

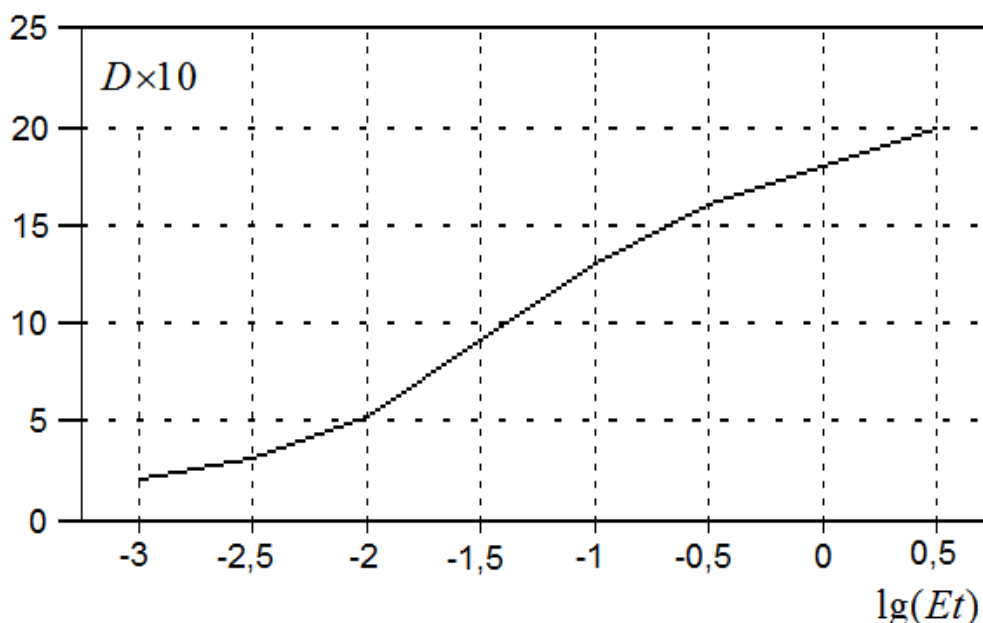


Рис. 15. Световая характеристика (характеристическая кривая) фотоматериала

Приемники, создающие изображение объекта (приемники изображения), характеризуются разрешающей способностью – наименьшим расстоянием между двумя точками, которые еще воспринимаются приемником как отдельные. У ЭОП разрешающая сила в центре поля зрения порядка  $40 \text{ мм}^{-1}$  (или лин/мм), у фотоматериалов – порядка  $90 \text{ мм}^{-1}$ . Имеются специальные эмульсии с разрешающей способностью до  $1000$  и даже до  $2000 \text{ мм}^{-1}$ , однако здесь сравнительно низкая светочувствительность. Разрешающая способность глаза на расстоянии наилучшего видения – около  $10 \text{ мм}^{-1}$ . Контраст изображения, которое дает приемник, ограничивает реальную разрешающую способность системы.

Итак, чувствительность и разрешающая способность приемника определяют уровень соответствующих погрешностей измерений.

Достоинство приборных приемников изображения в том, что они позволяют управлять яркостью, контрастом и четкостью видимого изображения и могут работать в условиях, находящихся за пределами чувствительности глаза. Такие приемники необходимы и при автоматизации оптических измерений, в том числе – для ввода данных в компьютер.

Достоинства оптических измерений, основанных на визуальных наблюдениях: простота, надежность, экономичность, оперативность, высокая производительность. Поэтому в широкой практике такие методы остаются наиболее распространенными.

Расширяется область методов оптических измерений, основанных на применении приборных приемников и систем обработки оптической информации в сочетании с визуальными методами наблюдения, что позволяет суммировать достоинства различных групп приемников.

### **Ошибки от нестабильности условий измерения**

В процессе измерения могут меняться: температура, давление, влажность воздуха. Влияют также вибрации прибора. Особенно сильно на точности измерений могут сказаться температурные колебания и вибрации прибора. Для устранения ошибок контактных измерений от изменения температуры ответственные части прибора изготавливаются из того же материала, что и измеряемые объекты, или с близкими коэффициентами линейного расширения. Ответственные узлы приборов или все помещение термостатируются. Измеряемые детали должны длительное время выдерживаться перед измерением в данном помещении для выравнивания температур. На крупных оптических предприятиях для контроля астрономической и другой крупногабаритной оптики создаются специальные помещения.

Вибрации могут привести к неустойчивости установки, увеличению погрешностей и даже к невозможности измерения. Для борьбы с ними применяются: фундаменты, не связанные со зданием, амортизация опор, демпфирование колеблющихся частей измерительной установки. Устранение влияния вибраций, особенно при измерении параметров крупногабаритных оптических деталей и систем, гораздо экономичнее осуществлять методом видеозаписи с последующей покадровой расшифровкой. Этот метод показал высокую эффективность и экономичность.

### **3.3. ВИДЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

По характеру и способам выявления и устранения (уменьшения) все погрешности, возникающие при измерении, можно разбить на три группы: систематические, случайные и промахи.

#### **Систематическая погрешность измерения**

*Систематическая погрешность измерения* – это составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той

же физической величины; ее природа и характер известны, а влияние на результат может быть учтено во время измерения или при обработке данных измерительных наблюдений.

Влияние систематических погрешностей на результат измерения может быть исключено при их выявлении и устранении путем совершенствования средства и методики измерения.

Примеры систематических погрешностей и способы их устранения:

- ошибки от неправильной установки нуля – исключаются определением нуля-пункта;
- ошибки от неточного деления шкал – исключаются путем введения в отсчеты поправок в соответствии с таблицей ошибок (даются в функции от измеряемой величины), составленной в результате аттестации шкалы, или путем применения при измерении специальных корректирующих устройств, автоматически исключающих ошибки из отсчетов;
- ошибки от параллакса сеток устраняются юстировкой прибора, а при неустранимом параллаксе ограничивают возможность поперечного перемещения глаза с помощью диафрагмы с небольшим отверстием, помещенной в выходном зрачке прибора;
- ошибки от эксцентриситета лимба (несовпадение центра делений лимба с центром его вращения) устраняются методом противопоставления, который состоит в усреднении двух отсчетов по диаметрально противоположным индексам, в результате которого ошибки, имеющие в обоих отсчетах разные знаки и одинаковую величину, устраняются.

В тех случаях, когда нет простых способов устранения систематических ошибок, ужесточают допуски на изготовление измерительного прибора или разрабатывают специальные методики измерения, в результате применения которых уменьшается влияние систематических ошибок на результат измерения.

### **Случайная погрешность измерения**

*Случайной погрешностью измерения* называется составляющая погрешности результата измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в серии повторных измерений одного и того же размера физической величины, проведенных с одинаковой тщательностью.



Природа случайных погрешностей обычно до конца неизвестна, а конкретная величина для отдельного измерения не может быть точно предсказана. Такие погрешности характеризуются степенью разброса данных измерительных наблюдений относительно среднего значения. Случайные погрешности выявляются при многократных отсчетах (измерительных наблюдениях). Эти погрешности не могут быть полностью исключены, но их влияние на результат измерения уменьшается с увеличением числа отсчетов. В своей совокупности они подчиняются законам теории вероятностей. Определение случайных погрешностей используется для оценки точности прибора и результата измерения.

### **Промах или грубая погрешность**

*Промахом* называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях погрешность.

Промахи могут быть вызваны неполадками аппаратуры и ошибками экспериментатора, они явно искажают результат измерения. При обработке данных измерительных наблюдений отсчеты с такими погрешностями выявляются и отбрасываются.

### **Средняя квадратическая погрешность единичного измерения**

*Средняя квадратическая погрешность единичного измерения* – это обобщенная характеристика рассеяния отсчетов, полученных в ряду независимых равноточных измерительных наблюдений одной и той же физической величины, вследствие влияния случайных погрешностей.

### **Средняя квадратическая погрешность результата измерения**

*Средней квадратической погрешностью результата измерения* называется характеристика случайной погрешности среднего арифметического значения отсчетов, полученных в ряду независимых равноточных измерительных наблюдений одной и той же физической величины.

### **Основная погрешность средства измерений**

*Основной погрешностью* средства измерения называется погрешность, определяемая в нормальных условиях его применения.

### **Дополнительная погрешность средства измерений**

*Дополнительная погрешность* – это составляющая погрешности средства измерения, возникающая вследствие отклонения какой-либо из влияющих величин от нормального ее значения или вследствие ее выхода за пределы нормальной области значений.

### **Нормальные условия измерений**

*Нормальными* называют условия измерений, характеризуемые совокупностью значений или областей значений влияющих величин, принимаемых за нормальные.

## **3.4. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ**

Рассмотрим необходимые основные понятия, связанные с методами обработки измерительных данных и получении результата оптических измерений. Подробно этот материал приведен в пособии [12], специально посвященном указанной теме.

Измерения в технике могут осуществляться в разных условиях. При измерении в цеховых условиях производится один-три отчета, а в качестве погрешности результата измерения указывается номинальная (паспортная) погрешность прибора. Например, если измерение производилось на вертикальном длинномере ИЗВ-2, то погрешность принимается равной  $\delta_{\text{ИЗВ}} = \pm(0,001 + L/200000)$  мм, где  $L$  – измеряемая длина.

В случае лабораторных измерений эксперимент проводится более тщательно. Соблюдаются необходимые условия измерения (температурный режим и т.д.), делается серия отсчетов, затем результаты обрабатываются в соответствии с методами математической статистики. Так как математическая статистика имеет дело только со случайными величинами, то предварительно из результатов измерения следует исключить систематические погрешности [13].

### **Исправленные результаты измерения**

*Исправленные результаты измерений* характеризуются тем, что из них исключены систематические погрешности.

При выполнении равноточных измерений, когда ко всем отсчетам следует относиться с одинаковой степенью доверия, разброс случайных погрешностей при большом числе отсчетов чаще всего

подчиняется закону нормального распределения. Результаты наблюдения формируются под влиянием большого числа независимо действующих факторов, каждый из которых оказывает незначительное действие по сравнению с суммарным действием всех остальных.

### Функция нормального распределения

В большинстве случаев случайные погрешности измерений подчиняются закону нормального распределения (функция Гаусса).

Функция нормального распределения исправленных результатов измерения имеет вид (рис. 16):

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right),$$

где  $x$  – результат единичного отсчета;  $P(x)$  – вероятность появления данного отсчета  $x$ .

Оценка истинного значения искомой величины  $Q$  и его точности является частным случаем статистической задачи нахождения параметров функции распределения на основании выборки. В данном случае выборкой является ряд отсчетов  $m_x$ , полученных в результате измерительных наблюдений.

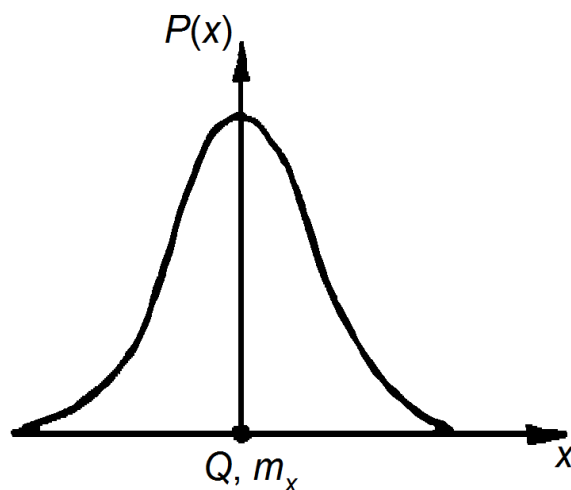


Рис. 16. Функция нормального распределения исправленных результатов измерения

## 4. ТОЧЕЧНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ

Оценку  $a^*$  параметра  $a$  назовем точечной, если она выражается одним числом.

Любая точечная оценка, вычисленная на основании опытных данных, является их функцией, и поэтому сама должна представлять собой величину с распределением, зависящим от распределения исходной случайной величины, в том числе от самого оцениваемого параметра, и от числа опытов  $n$ .

К точечным оценкам предъявляется ряд требований, определяющих их пригодность для описания самих параметров.

1. Оценка называется состоятельной, если при увеличении числа наблюдений она приближается (сходится по вероятности) к значению оцениваемого параметра.
2. Оценка называется несмещенной, если ее математическое ожидание равно оцениваемому параметру.
3. Оценка называется эффективной, если ее дисперсия меньше дисперсии любой другой оценки данного параметра.

Получаемая в результате многократных наблюдений информация об истинном значении измеряемой величины и рассеивании результатов наблюдений состоит из ряда результатов отдельных измерительных наблюдений:  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , где  $n$  – число наблюдений.

### Истинное значение искомой величины

В качестве оценки *истинного значения* измеряемой величины естественно принять среднее арифметическое  $\bar{x}$  полученных результатов наблюдений, т.е. массива полученных измерительных отсчетов  $x_i$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i .$$

Оно считается наиболее вероятным значением искомой величины, если отсутствуют или исправлены систематические погрешности и отброшены промахи.

### Среднеквадратическое отклонение

*Среднеквадратическое отклонение* (СКО) ряда измерительных отсчетов (наблюдений) при конечном числе отсчетов находят по формуле:

$$\sigma_x = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-1}} ,$$

где  $V_i = x_i - \bar{x}$ .

Эта оценка характеризует степень концентрации отдельных наблюдений относительно среднего арифметического (разброс результатов); СКО является характеристикой точности метода и средства измерения.

### **Точность результата измерения**

*Точность результата измерения* характеризуется как СКО среднего арифметического измерения:

$$S_{\bar{x}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n(n-1)}} = \pm \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}.$$

### **Вероятная (доверительная) погрешность**

$$R_{\bar{x}} \cong \frac{2}{3} S_{\bar{x}}$$

также может служить для характеристики результата измерения

$$L_{\bar{x}} = 3S_{\bar{x}}.$$

### **Предельная погрешность**

Так как погрешности, больше чем  $3\sigma$ , маловероятны, то интервал  $\pm 3\sigma_x$  считается интервалом практически возможных значений случайных погрешностей, и если отсчет имеет остаточную погрешность, превышающую величину  $\pm 3\sigma_x$ , то он квалифицируется как промах.

### **Результат измерения**

*Результат измерения* можно записать в виде:

$$Q = \bar{x} \pm S_{\bar{x}}$$

при  $\alpha=0,95$ , где  $Q$  – истинное значение измеряемой величины, которое лежит в интервале, накрываемом правой частью равенства с некоторой вероятностью  $\alpha$ , значение которой необходимо определить по соответствующей методике [14]. На практике чаще всего принимают, как указано,  $\alpha=0,95$ .

Итак, результат измерения – это оценка истинного значения измеренной величины и погрешности в виде доверительного интервала, за пределы которого с заданной вероятностью не выходит истинное значение измеренной величины.

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРА

При определении погрешности прибора производится суммирование ошибок от разных источников. При этом случайные независимые погрешности подчиняются закону нормального распределения, поэтому следует производить их квадратичное сложение:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_n^2},$$

где  $\sigma_1, \dots, \sigma_n$  – отдельные средние квадратические погрешности от разных источников.

Систематические погрешности складывают алгебраически с учетом их знака.

Используя полученные таким образом данные, можно в процессе проектирования измерительных приборов заранее рассчитать суммарную погрешность их показаний и устранить источники наибольших погрешностей или, наоборот, при заданной точности прибора рассчитать допуски на составляющие погрешности.

Для того чтобы проще характеризовать экспериментальную погрешность прибора, на практике часто определяют вариацию показаний

$$W = X_{\max} - X_{\min},$$

где  $W$  – размах показаний при прямом и обратном ходе отчетного устройства.

Второй важной характеристикой является порог чувствительности – наименьшее значение величины, которое еще можно измерить с помощью отчетного устройства прибора.

Подробные указания и справочные данные, необходимые в процессе обработки данных измерительных наблюдений, содержатся в специально посвященных этой теме пособиях (например, [15]).

## 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ (МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ)

Выбор оптического метода измерения зависит от поставленной измерительной задачи: требований к точности, оперативности, наглядности степени автоматизации, объемов измерений.

Избранные или разработанные принципы измерений реализуются в средствах измерений. Метод измерения рассматривается как способ решения измерительной задачи; он характеризуется принципом измерения и его теоретическим обоснованием, а также основными приемами применения соответствующих средств измерений.

### Методика измерения

Это технология (алгоритм) измерения с целью наилучшей реализации метода. С целью унификации измерений их методика обычно регламентируется нормативно-техническим документом.

### Метрологические характеристики средства измерения

Характеристики:

- цена деления шкалы;
- диапазон измерений;
- чувствительность;
- точность прибора.

*Метрологические характеристики* позволяют судить о пригодности прибора для выполнения измерений в необходимом диапазоне и с требуемой точностью.

### Функция преобразования

Метрологические характеристики определяются на основании зависимости  $y'=F(y)$  между входным сигналом  $y$ , связанным с измеряемым параметром (величиной), и сигналом  $y'$  на выходе прибора. Данная зависимость называется градуировочной характеристикой или функцией преобразования (ФП), свойственной методу и средству измерения (рис. 17).

Номинальная ФП определяется принципом измерения. Реальная ФП измерительного прибора (установки) имеет отличия от номинальной (рис. 17, а); эти отличия связаны с погрешностями прибора. Величины  $y$  и  $y'$  могут иметь разный физический смысл и размерность.

### Коэффициент преобразования

Величина  $M=y/y'$  называется коэффициентом преобразования. Величина  $M$  определяется по ФП. Исходя из коэффициента преобразования определяется цена деления шкалы. Если ФП линейна, коэффициент преобразования сохраняется постоянным независимо от величины  $y'$ .

При нелинейной ФП коэффициент преобразования изменяется (рис. 17).

### Характеристика преобразования

Совокупность коэффициентов преобразования  $M$ , соответствующая градуировочной характеристике, называется характеристикой преобразования и представляет собой зависимость  $M$  (градиента ФП) от величины сигнала  $y'$  на выходе прибора (рис. 17, б). В реальных измерительных приборах интервалы (цены) делений всей измерительной шкалы принимаются одинаковыми, несмотря на непостоянство реального коэффициента преобразования  $M_p$ , и вычисляются исходя из номинального коэффициента преобразования  $M_n$ . При этом возникает погрешность показаний прибора, которая называется рен.

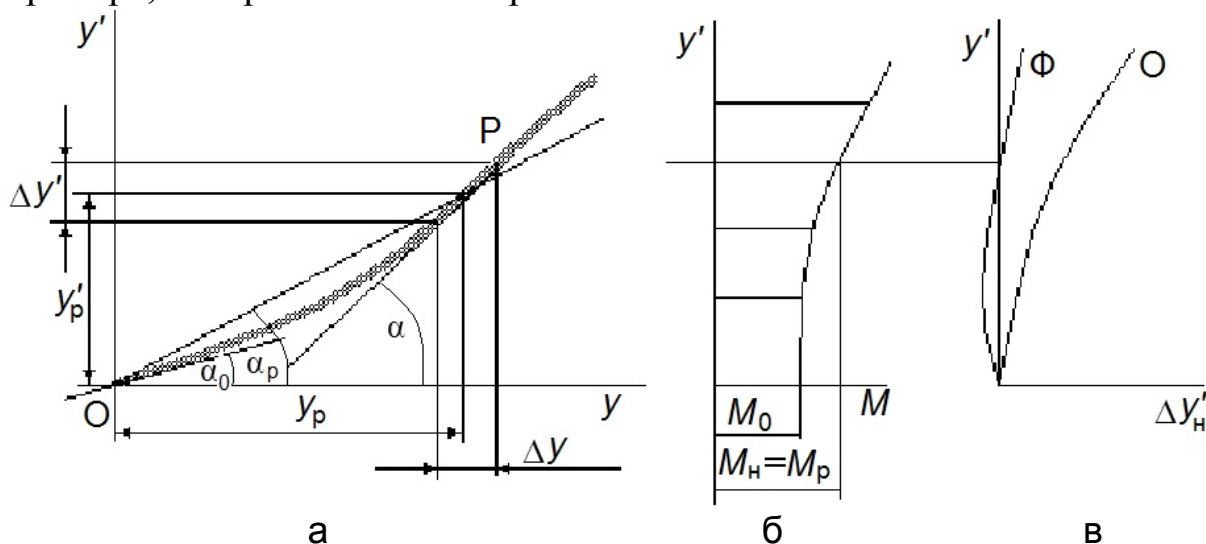


Рис. 17. Функция преобразования

Пример: пусть ФП выражает зависимость между величинами предмета и изображения, сформированного объективом оптического измерительного прибора (рис. 17, а).

При дисторсии объектива коэффициент преобразования в параксиальной области имеет величину

$$M_0 = \operatorname{tg} \alpha_0,$$



где  $\alpha_0$  – градиент ФП (угол наклона касательной) в точке 0.

В зоне Р поля имеем:

$$M_p = \operatorname{tg} \alpha_p.$$

Оптическая дисторсия отображается кривой О на рис. 17, в. Она соответствует рену, возникающему при условии  $M_n = M_0$ .

Из условия минимизации значений  $\Delta y'_n$  величина  $M_n$  может быть выбрана по условию:  $M_n \neq M_0$ ,  $M_n = M_p$ . Соответствующий этому случаю рен называют фотограмметрической дисторсией, что графически выражается кривой Ф на рис. 17, в. Здесь  $\Delta y'_n = y' - yM_n$ .

Чувствительность метода и прибора оптического измерения находится также на основании ФП. Под чувствительностью  $S$  понимается отношение приращения сигнала  $\Delta y'$  на выходе прибора к приращению  $\Delta y$  сигнала на входе, когда последнее стремится к нулю:

$$S = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta y'}{\Delta y} \right) = \frac{dy'}{dy}.$$

Для данной точки ФП чувствительность  $S$  выражается тангенсом угла  $\alpha$  наклона касательной (рис. 17, а). Если ФП прибора линейна, то его чувствительность постоянна. Чувствительность оптического измерительного прибора, оснащенного системой, формирующей изображение, соответствует масштабу, с которым изображаются элементарные отрезки  $\Delta y$ . При наличии дисторсии значение масштаба (т.е. увеличения, даваемого оптической системой) изменяется по полю, соответственно изменяется и чувствительность.

### **Порог чувствительности**

*Порог чувствительности*  $\Delta y_t$  – представляет собой минимальное приращение сигнала  $y$ , связанного с объектом, способное вызвать минимальную ощутимую реакцию прибора.

Наличие порога чувствительности оптических измерительных приборов связано с ограниченными возможностями оптических систем, приемников изображения и механизмов прибора. Основные причины этих ограничений – волновые свойства света, квантовый механизм взаимодействия излучения с веществом, а также трение.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В части 1 показана роль оптических измерений и их особое место в общей системе средств измерений, что связано с уникальными возможностями оптических измерений, объединяющих наивысшие точности с непревзойденной наглядностью и информативностью. Дается классификация групп оптических измерений. Рассматриваются необходимые основные понятия метрологии, классифицируются погрешности оптических измерений и анализируются их источники. Даны понятия об измерительных наблюдениях, измерительных данных, методах обработки данных и получении результата оптических измерений, о метрологических характеристиках оптического измерения, связанных с его функцией преобразования.

## 8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 304 с.
2. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. и др. Оптические измерения. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 416 с.
3. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
4. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 131 с.
5. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. – 89 с.
6. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Сборник вопросов и задач. Часть 2. Оценка качества оптического изображения. – СПб.: НИУ ИТМО, 2011. – 158 с.
7. Гордов А.Н., Парфенов В.Г., Лукьянов Г.Н., Потягайло А.Ю., Шарков А.В. Основы метрологии. Учебное пособие по курсу «Основы метрологии и планирование эксперимента». – Л.: ЛИТМО, 1983. – 84 с.
8. Прокопенко В.Т. Оптические измерения. Конспект лекций. – СПб.: СПб ГИТМО, 2002.
9. Афанасьев В.А. Оптические измерения. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 229 с.
10. Лившиц Э.М. Оптические измерения и исследования оптических систем. Методические указания. – Л.: ЛИТМО, 1986.
11. Порохова Т.Г. Оптические измерения. Конспект лекций. Ч. 1. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1976. – 126 с.
12. Еськова Л.М. Обработка результатов измерений. Краткие методические указания по получению результата измерений при выполнении лабораторных работ по курсу «Оптические измерения». – СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 15 с.
13. Лившиц Э.М. Оптические измерения. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 87 с.

14. Еськова Л.М. Оптические измерения. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 89 с.
15. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Учебное пособие по лабораторному практикуму. – 2-е изд. – СПб.: Университет ИТМО, 2014. – 130 с.

## **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**

1. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984.
2. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. ВВЕДЕНИЕ. РОЛЬ ИЗМЕРЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ЖИЗНИ.....</b>	<b>3</b>
1.1. Соотношение между метрологией и наукой о технических измерениях.....	6
Измерение.....	6
Метрология.....	7
Единство измерений.....	8
Метрологическая суть измерения.....	8
Цель измерения.....	8
Оценивание.....	8
<b>2. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>9</b>
Метод измерения.....	9
Принцип измерения.....	9
Средства измерения.....	9
Методика измерений.....	9
Условия измерения.....	9
2.1. Оптические методы измерений.....	9
Прямое измерение.....	10
Косвенное измерение.....	12
2.2. Совокупные измерения.....	13
Метод непосредственной оценки.....	14
Дифференциальный метод.....	15
Совместные измерения.....	16
Нулевой метод.....	17
Метод совпадений.....	18
Правильность измерений.....	18
Достоверность измерения.....	19
Повторяемость измерений.....	19
Воспроизводимость результатов измерений.....	19
Измерительное наблюдение.....	19
2.3. Средства измерений. Эталоны. Образцовые и рабочие средства измерений.....	19
Средство измерений.....	20
Эталон.....	20
Образцовые средства измерений.....	20

Рабочие средства измерений.....	20
Измерительный прибор.....	20
Поверенный измерительный прибор.....	21
Измерительный преобразователь.....	21
Измерительная установка.....	21
<b>3. ПОГРЕШНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>22</b>
Характеристики метода измерения – погрешность и диапазон.....	22
Точность результата измерения.....	22
Погрешность измерения.....	22
Диапазон измерения.....	22
3.1. Типы погрешностей.....	23
Методические погрешности.....	23
Инструментальные погрешности.....	23
3.2. Источники погрешностей при оптическом измерении.....	24
Источники погрешностей, связанные с объектом.....	24
Источники ошибок измерений, связанные с прибором.....	27
Источники погрешностей от приемников излучения.....	28
Ошибки от нестабильности условий измерения.....	30
3.3. Виды погрешностей.....	30
Систематическая погрешность измерения.....	30
Случайная погрешность измерения.....	31
Промех или грубая погрешность.....	32
Средняя квадратическая погрешность единичного измерения.....	32
Средняя квадратическая погрешность результата измерения.....	32
Основная погрешность средства измерений.....	32
Дополнительная погрешность средства измерений.....	33
Нормальные условия измерений.....	33
3.4. Способы обработки результатов измерения.....	33
Исправленные результаты измерения.....	33
Функция нормального распределения.....	34
<b>4. ТОЧЕЧНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ.....</b>	<b>35</b>
Истинное значение искомой величины.....	35
Среднеквадратическое отклонение.....	35
Точность результата измерения.....	36
Вероятная (доверительная) погрешность.....	36

Пределная погрешность.....	36
Результат измерения.....	36
<b>5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРА.....</b>	<b>37</b>
<b>6. ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ (МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ).....</b>	<b>38</b>
Методика измерения.....	38
Метрологические характеристики средства измерения.....	38
Функция преобразования.....	38
Коэффициент преобразования.....	39
Характеристика преобразования.....	39
Порог чувствительности.....	40
<b>7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>41</b>
<b>8. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>42</b>

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ**

Кафедра прикладной и компьютерной оптики является одной из крупнейших кафедр российских вузов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: кафедры теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. На кафедре обучают специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом – от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами, другими приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкций.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.



Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П. Королева, Ю.А. Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие – в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра Прикладной и компьютерной оптики Факультета лазерной и световой инженерии Мегафакультета фотоники является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте: **[aco.ifmo.ru](http://aco.ifmo.ru)**

**Владимир Константинович Кирилловский  
Татьяна Вячеславовна Точилина**

**Оптические измерения.**

**Часть 1. Введение и общие вопросы.**

**Точность оптических измерений**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Дизайн

Верстка

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Подписано к печати 22.12.2016

Заказ № 3805

Тираж 50 шт.

Отпечатано на ризографе

Т.В. Точилина

Т.В. Точилина

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49