

**Лекция №7**

# **Металлорежущие станки**

Технические измерения геометрической и  
кинематической точности металлорежущих станков

## Содержание

- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

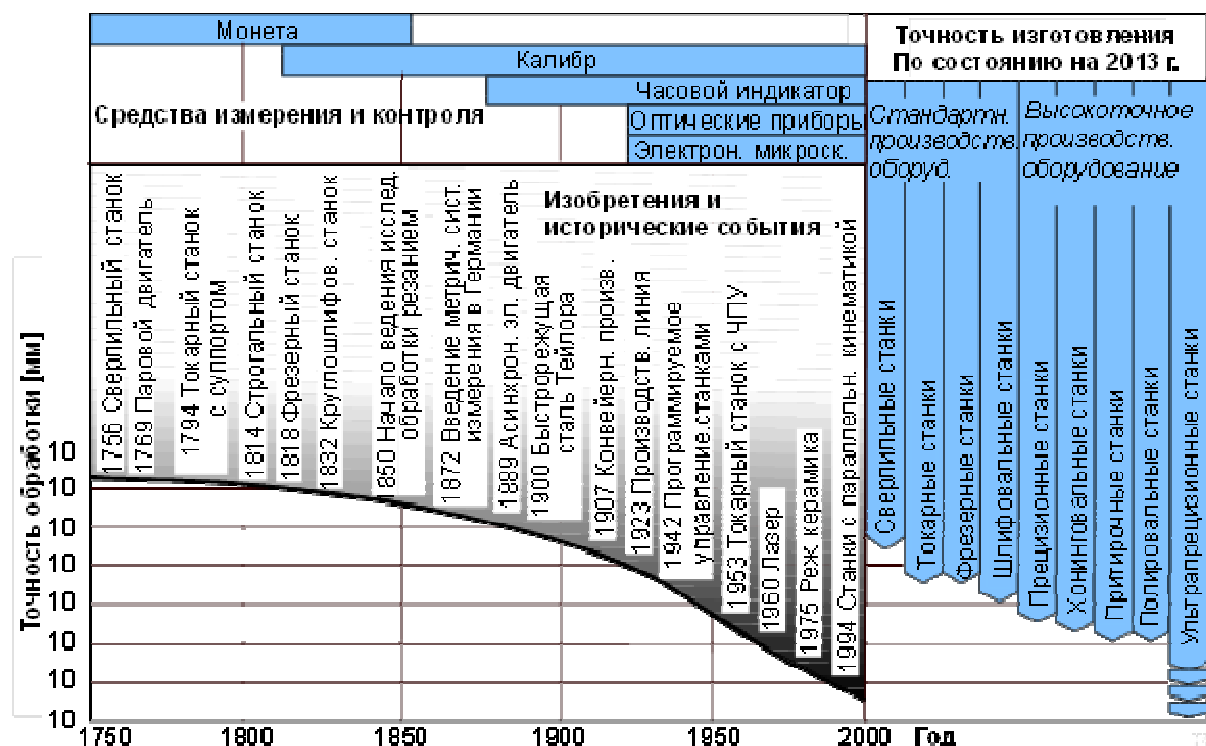


Рис. 7-1: Историческое развитие точности металлообработки

Технический прогресс в области обрабатывающего инструмента влечет за собой обновление станочного парка. Увеличиваются скорости шпинделя и подачи, растут силы резания и мощность привода. Повышаются требования к точности станка.

На Рис. 7-1. показано развитие точности металлообработки за последние 250 лет. Принято различать станки нормальной, повышенной и сверхвысокой точности. Неуклонное совершенствование точности станков позволяет предположить, что когда-нибудь стандартное производственное оборудование – токарные и фрезерные станки – будет соответствовать сегодняшнему высокоточному. Произойдет это или нет, несомненно, наряду с высокоточным, сохранится производство «не ответственных» деталей.

Точность, производительность, экологичность и надежность металлообрабатывающего оборудования оказывают существенное влияние на качество обрабатываемых деталей и экономичность производства. На Рис. 7-2 представлены основные требования к металлорежущим станкам. Степень соответствия данным требованиям определяет характеристики станка и, тем самым, технологическую область его применения.

Интенсивное развитие систем числового программного управления позволило повысить степень автоматизации, а также требования к точности и производительности производственных процессов. Параметрами, в значительной степени определяющими точность обработки, являются геометрическая и кинематическая точность станков. Среди многочисленных факторов, влияющих на точность обработки, наряду с ошибками изготовления и монтажа отдельных компонентов, следует выделить деформации станка под нагрузкой. Величина деформации станка зависит от величины сил, возникающих при обработке, от собственного веса компонентов станка, а также величины термической деформации.

Производительность

Точность

Экологичность

Надежность



Источник: DMG

Производительность								
Точность					Экологичность		Надежность	
Ошибки ■ Произв-ва ■ Монтажа ■ Управления 	Статическ. жесткость	Динамич. податли-вость	Температ. деформации	Динамика приводов и управление	Шум	Смазочно-охлажд. вещества	Охрана труда	Частота отказов
	 без нагрузки	 под нагрузкой	 под нагрузкой	 под нагрузкой	 Вибрации	 под нагрузкой	 Эргономика	Ремонто-пригодность  Определение причин отказа

Рис. 7-2: Требования к металлообрабатывающим станкам

Степени влияния перечисленных и иных параметров на геометрические и кинематические характеристики станка, а значит, на его точность, определяется методами технического контроля. По результатам измерений ненагруженного станка и под нагрузкой определяют его соответствие той или иной категории точности.

Современные условия приемки станков берут свое начало в 20-х годах прошлого века, когда профессор Шлезингер предложил первые программы приемных испытаний. Нормированные в этих программах измерения плоскостности, параллельности, перпендикулярности, осевого и радиального биения шпинделей, дополняются сегодня техническими требованиями к новым типам станков. Такие дополнения вносят различные союзы и объединения машиностроителей.

Точность обработки деталей на металлообрабатывающих станках, включая оборудование для обработки давлением и для физико-технической обработки, зависит от различных факторов. К ним относятся: геометрические неточности инструмента, податливость инструмента, детали и зажимного приспособления, технологические ошибки, податливость структуры станка, неточность заданного относительного перемещения детали и инструмента. В данной главе рассматривается влияние факторов, связанных только с конструкцией станка.

Различают геометрические и кинематические отклонения точности станка. Геометрическим отклонением называется суммарное отклонение формы и положения компонентов станка от заданных. Здесь речь идет об узлах и деталях, исполняющих функции перемещений, направлений и фиксации. Как правило, перемещения функциональных компонентов станка осуществляется вдоль нескольких, до пяти и более, взаимосвязанных осей, поэтому, кроме отклонений отдельных компонентов и их траекторий, важными являются отклонения взаимного расположения осей станка.

Кинематическим отклонением называется искажение заданной зависимости функционально связанных движений. Часто причиной кинематических отклонений являются геометрические отклонения задействованных в совместном перемещении компонентов.

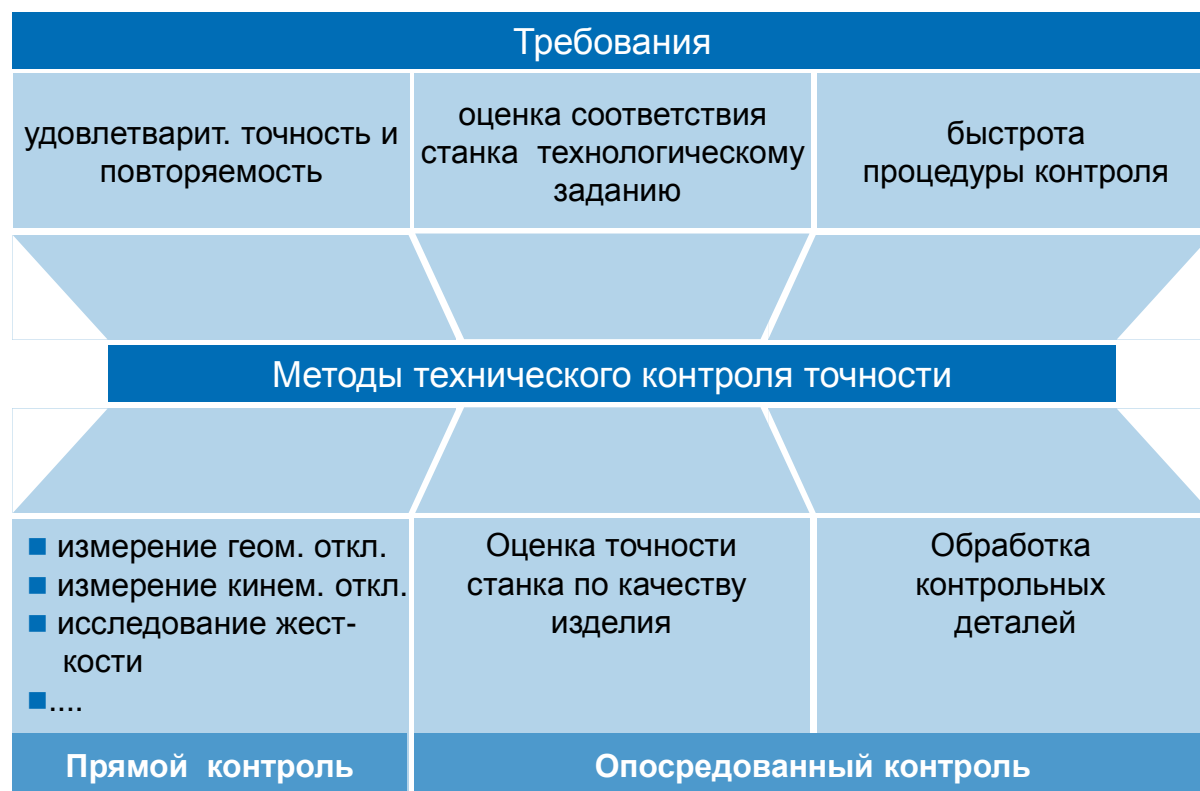


Рис. 7-3: Требования к методам технического контроля точности станков

Для оценки качества станков привлекаются соответствующие методы. Соответственно техническим требованиям выбираются станочные характеристики и назначаются допуски на устанавливаемые предельные значения измеряемых величин. Правило здесь: выбор станка определяется техническими требованиями к номенклатуре деталей, для производства которой он предназначен. Чем точнее станок, тем он дороже!

Методы технического контроля разделяют на прямые и опосредованные. Основные требования к техническим методам контроля параметров станков представлены на Рис. 7-3. Прежде всего, измерение должно осуществляться с удовлетворительными точностью и повторяемостью. Схемы измерений должны охватывать возможно большее число важных производственных задач, условия обработки, системы приспособление-инструмент-деталь и др., а в затратной части - применимы не только в лабораторных, но, прежде всего, в условиях производства.

Прямые и опосредованные методы измерений отвечают этим требованиям, но решают разные задачи. Для выявления неточностей с их последующим конструктивным устранением, нужны прямые измерения. Решение о приемке станка выносят, как правило, по результатам опосредованного контроля.

Прямым методом, с помощью измерительных приборов, определяют конкретные параметров станка. Прямой метод позволяет выявить ошибку, локализовать ее, установить причину ее возникновения и принять конструктивные или технологические меры для ее устранения. Использование прямого метода измерения для выходного контроля серийного станка сопряжено со значительными затратами времени и средств и вряд ли целесообразно.

В ходе применения опосредованных методов измерения на станке изготавливают контрольную деталь специальной геометрической формы. По результатам измерений изготовленной детали делают вывод о точностных показателях станка. Анализ причин возникновения тех или иных отклонений в данном случае затруднен, поскольку на точностные показатели обработки оказывают влияние многие взаимосвязанные компоненты станка. При составлении заключения о качестве принимаемого станка, следует учитывать случайные факторы процесса резания, которые ухудшают геометрическую точность и качество поверхности контрольной детали.

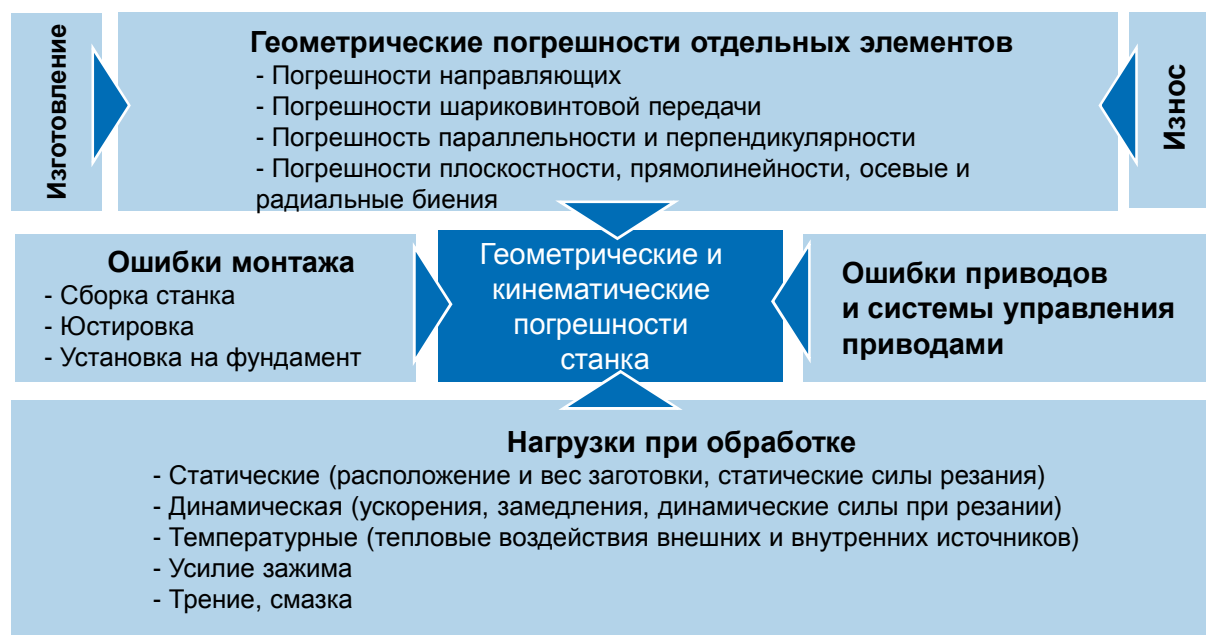


Рис. 7-4: Источники геометрических и кинематических погрешностей

Геометрические погрешности определяются отклонениями формы и положения компонентов и отклонениями взаимного расположения осей станка.

Кинематические погрешности определяются отклонениями траекторий движения по функционально связанным осям станка.

Геометрические погрешности новых станков вызваны неточностью изготовления и монтажа деталей и узлов. Накапливающийся в процессе эксплуатации износ направляющих и подшипников, наросты и коробление – все это снижает геометрическую точность. Причиной и геометрической, и кинематической погрешности может оказаться система управления станка. Не последнюю роль в возникновении геометрических и кинематических погрешностей играют нагрузки, действующие в процессе обработки, такие, как инерция, трение, силы резания, тепло (Рис. 7-4).

Основной задачей контроля геометрической точности является измерение параметров линейного и вращательного перемещения компонентов станка, например, ползунов, столов или шпинделей. Схемы и условия проведения многих видов измерений заключены в специальные нормы и стандарты. Некоторые из таких измерений являются обязательными при приемке металлообрабатывающих станков.

Проведение всеобъемлющих исследований геометрической и кинематической точности станка связано с чрезвычайно высокими затратами времени и средств. Поэтому на практике осуществляется опосредованный контроль параметров станка с помощью изготовления контрольной детали или процедуры экспресс-диагностики, например измерение точности круговой траектории. Обнаруженные таким образом погрешности определяют программы прямых измерений в предполагаемых зонах искажений.

## Содержание

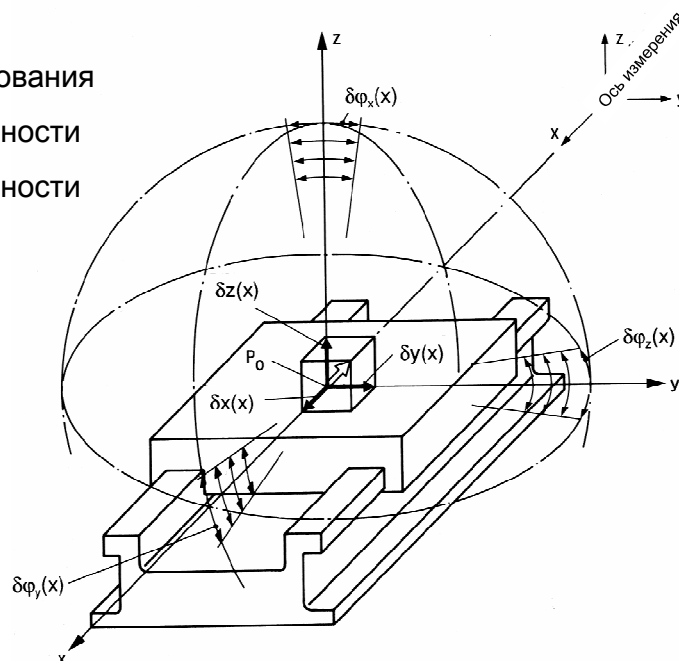
- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

**Линейные погрешности**

- $\delta x(x)$ : Погрешность позиционирования
- $\delta y(x)$ : Погрешность прямолинейности
- $\delta z(x)$ : Погрешность прямолинейности

**Ротационные погрешности**

- $\delta\varphi_x(x)$ : Качка
- $\delta\varphi_y(x)$ : Тангаж
- $\delta\varphi_z(x)$ : Рыскание

**Рис. 7-5: Степени свободы по линейным осям станка**

Геометрическая погрешность положения движущейся детали определяется шестью величинами, аналогично определению положения твердого тела через шесть степеней свободы. Например, поступательно перемещаемый по направляющим ползун имеет одну линейную степень свободы движения по оси подачи, а остальные пять жестко связаны направляющими. Позиционирование ползуна по свободной оси осуществляется с помощью его привода. Тем не менее, отклонения от идеального положения ползуна присутствуют по всем шести осям, представляющим свободные и связанные поступательные и вращательные перемещения (Рис. 7-5).

Для произвольно выбранной точки ползуна различают три погрешности поступательных перемещений. Применительно к движению подачи по оси  $x$  данные отклонения имеют следующие обозначения:

- $\delta x(x)$  Погрешность позиционирования (по оси  $x$ );
- $\delta y(x)$  Погрешность прямолинейности по оси  $y$ ;
- $\delta z(x)$  Погрешность прямолинейности по оси  $z$ .

Первый индекс указывает ось координат, по которой измеряется величина погрешности. В скобках указана ось направления движения. Для полного описания возможных положений произвольной точки  $P_i$  относительно выбранной точки  $P_0$  требуется ввести дополнительные величины, характеризующие ротационные погрешности трем координатным осям. Применительно к показанной на рисунке координатной системе, ротационные погрешности имеют следующие обозначения:

- $\delta\varphi_x(x)$  качка вокруг оси движения подачи
- $\delta\varphi_y(x)$  тангаж (вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной к оси движения)
- $\delta\varphi_z(x)$  рыскание вокруг вертикальной оси

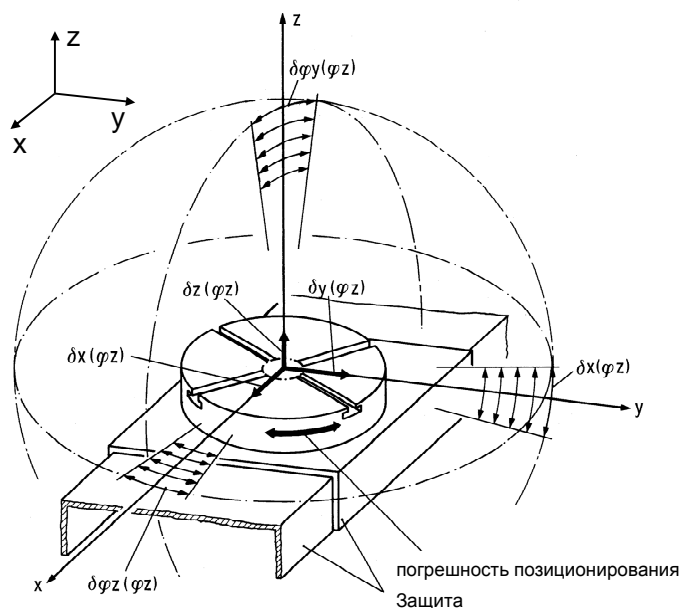
Данные виды линейных и ротационных геометрических погрешностей позволяют полностью описать положение произвольной точки ползуна в движении при условии, что деформация ползуна отсутствует.

**Линейные погрешности**

- $\delta z(\varphi_z)$ : осевое биение
- $\delta y(\varphi_z)$ : радиальное биение, эксцентриситет
- $\delta x(\varphi_z)$ : радиальное биение, эксцентриситет

**Ротационные погрешности**

- $\delta\varphi_z(\varphi_z)$ : погрешность позиционирования
- $\delta\varphi_y(\varphi_z)$ : качание вокруг оси Y
- $\delta\varphi_x(\varphi_z)$ : качание вокруг оси X

**Рис. 7-6: Погрешности ротационных осей станка**

Помимо контроля поступательного движения деталей станков, необходимо производить проверку геометрической точности вращения поворотных компонентов, поскольку именно от них в решающей степени зависит конечная точность обработки.

Для контроля поворотной оси, например в случае приемки станка, погрешность вращения шпинделя определяется прямым методом, т.е. измерением радиального биения, или опосредованно – измерением контрольной детали.

Погрешности оси вращения шпинделя, позиционирования поворотного стола, отклонения формы сопрягаемых поверхностей шпинделя влияют на качество работы станка.

Аналогично шести геометрическим погрешностям поступательного движения, различают шесть геометрических отклонений от идеального вращательного движения (Рис. 7-6).

Ротационные погрешности оси вращения могут различаться направлениями движений и вызывающими их причинами.

Геометрические, статические, динамические и тепловые характеристики шпинделя и приложенные нагрузки определяют величины ротационных погрешностей его оси.

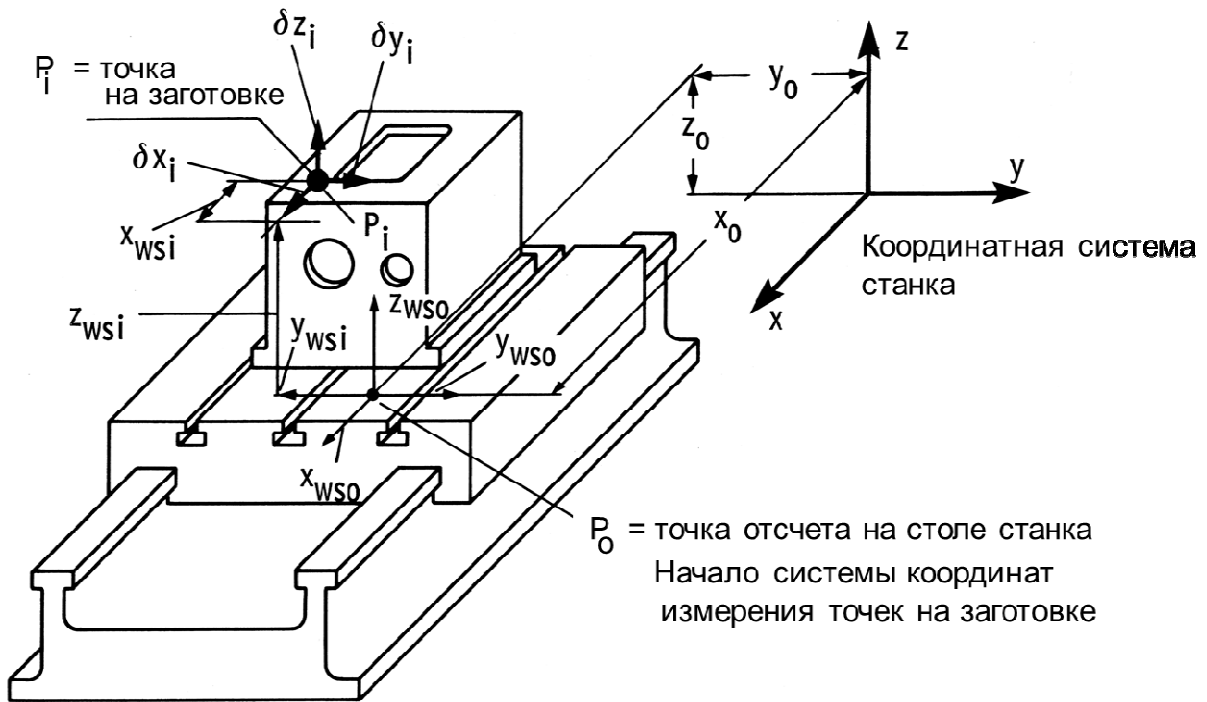


Рис. 7-7: Определение координат станка и заготовки

Все вышеперечисленные погрешности измеряются в одной фиксированной точке  $P_0$ , определяющей положение рабочего стола. Для определения отклонения положения от заданного в любой точке  $P_i$  заготовки, закрепленной на рабочем столе, следует, наряду с поступательными, учитывать ротационные погрешности -  $\delta\varphi_x$ ,  $\delta\varphi_y$  и  $\delta\varphi_z$ . (Рис. 7—6; 7—7)

Расчет погрешности положения произвольной точки  $P_i$  заготовки на рабочем столе проводят при условии, что форма стола идеальна. Т.к. величины углов  $\delta\varphi_x$ ,  $\delta\varphi_y$  и  $\delta\varphi_z$  малы, геометрическая погрешность  $\{a\}_{(x_0, x_{wsi})}$  точки на заготовке  $P_0$   $x_{wsi}$  с координатами  $\{x_{wsi}, y_{wsi}, z_{wsi}\}$ , измеряемыми от точки  $P_0$ , выражается следующей формулой:

$$\{a\}_{(x_0, x_{wst})} = \{a_T\}_{(x_0)} + [A]_{(x_0)} \cdot \{X_{wsi}\} \quad (7-1)$$

Или:

$$\begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{Bmatrix}_{(x_0, x_{wst})} = \begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{Bmatrix}_{(x_0)} + \begin{bmatrix} 0 & -\delta\varphi_z & \delta\varphi_y \\ \delta\varphi_z & 0 & -\delta\varphi_x \\ -\delta\varphi_y & \delta\varphi_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_{wsi} \\ y_{wsi} \\ z_{wsi} \end{Bmatrix} \quad (7-2)$$

Где  $X_0 = \{x_0, y_0, z_0\}$  - координаты положения рабочего стола в точке  $P_0$ .

$X_{wsi} = \{x_{wsi}, y_{wsi}, z_{wsi}\}$  - Координаты точки на заготовке, измеряемые от точки  $P_0$ .

Причем  $\{a_T\}_{(x_0)}$  есть вектор геометрических погрешностей поступательного движения компонента в исходной точке  $P_0$  в положении ползуна  $X_0$ . Для всех точек, кроме исходной, в дополнение к поступательным погрешностям необходимо учесть воздействие геометрических погрешностей вращательного движения. Это осуществляется посредством второго слагаемого в уравнении для расчета суммарной геометрической ошибки. Здесь  $[A]_{(x_0)}$  - матрица геометрических погрешностей вращательных движений стола в положении  $X_0$  в координатной системе станка.

## Погрешности системы зажима заготовки Погрешности системы зажима инструмента

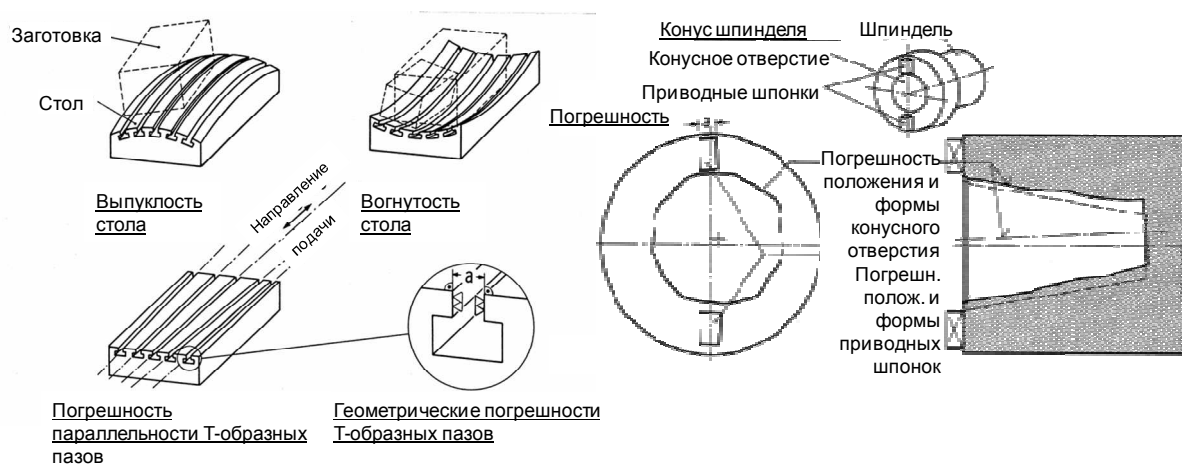


Рис. 7-8: Геометрические погрешности систем зажима инструмента и детали

Контроль геометрических характеристик станков включает измерения размера, формы, взаимного положения и перемещения компонентов, отвечающих за качество обработки. В последующих разделах будут показаны виды технических измерений геометрической и кинематической точности станка в нагруженном состоянии. Тепловая нагрузка станка не предполагает внесение изменений в схему измерений геометрической точности. Напротив, при наложении занимающей часть рабочего пространства статической нагрузки в виде имитации веса заготовки, измерения затрудняются. Статические и динамические нагружения компонентов для измерения их влияния на геометрию станка во время движения представляют значительные технические трудности, поэтому измерения относительной жесткости станка в зоне обработки проводятся, как правило, в состоянии покоя. Специальные вспомогательные измерительные приспособления, необходимые для выяснения зависимых от нагрузки характеристик станка, будут рассмотрены ниже более подробно. При выяснении геометрических погрешностей станка, прежде всего, необходимо определить точность систем зажима инструмента и детали, их взаимного расположения и положения относительно осей станка. Примеры отклонения формы и положения стола заготовки и внутреннего конуса шпинделя показаны на Рис. 7-8. Типичными геометрическими погрешностями поверхностей рабочих столов являются их выпуклость, вогнутость, разнообразные механические повреждения, а также погрешности формы и параллельности крепежных пазов. Геометрические ошибки внутреннего конуса шпинделя, предназначенного для крепления оправок сверлильного и фрезерного инструмента, ведут к неполному зажиму и ошибочному позиционированию инструмента - осевому и радиальному биению, которые прямо отражаются на точности относительных перемещениях подачи заготовки и инструмента.

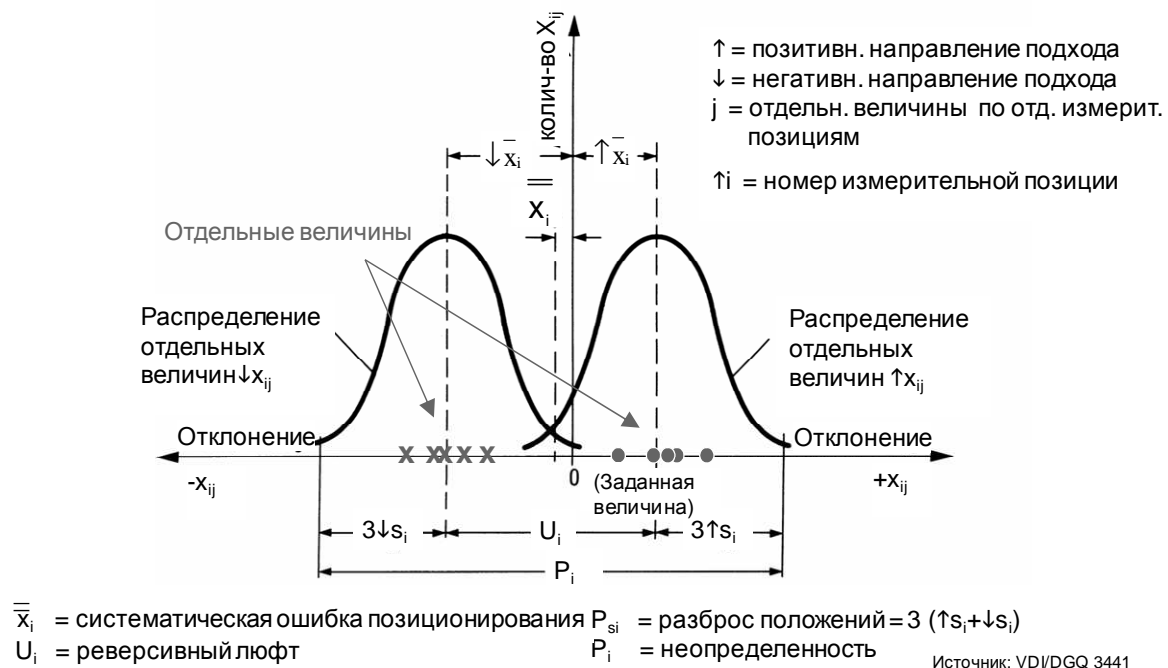


Рис. 7-9: Распределение измерительных величин, статистический анализ

Для разделения систематических и случайных ошибок в каждом контрольном положении осей, измерения проводятся несколько раз. Подход к контрольному положению оси осуществляется с двух сторон (с положительным и отрицательным направлением подачи). Результаты измерения сохраняются в ЭВМ системы контроля и обрабатываются с применением статистических методов (Рис. 7-9). Как правило, наблюдается разброс измеренных значений вокруг некоторого среднего значения, адекватно описываемый распределением Гаусса. При перемещении в заданные контрольные положения оси при положительном и отрицательном направлении подачи, средние значения распределения Гаусса, как правило, не совпадают. Поэтому для оценки геометрической точности различают следующие величины:

↑ $\bar{x}_i$ , ↓ $\bar{x}_i$  Среднее значение распределения измеренных величин при положительном и отрицательном направлении движения подачи в i-том осевом положении.

↑s<sub>i</sub>, ↓s<sub>i</sub> Нормальное отклонение для положительного и отрицательного направления подачи в i-том осевом положении (при условии нормального распределения).

$\bar{s}_i$  Среднее нормальное отклонение измеренных значений в i-том осевом положении.

$\bar{x}_i$  Систематическая ошибка позиционирования в i-том осевом положении

$$\bar{x}_i = \frac{(\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow)}{2}; \quad \bar{s}_i = \frac{\uparrow s_i + \downarrow s_i}{2}$$

U<sub>i</sub> Реверсивный люфт в i-том положении:  $U_i = |\bar{x}_i \downarrow - \bar{x}_i \uparrow|$

P<sub>i</sub> Разброс значений положения в i-том положении:  $P_{s_i} = 6\bar{s}_i$

P<sub>U<sub>i</sub></sub> Неопределенность позиционирования в i-том положении:  $P_{U_i} = U_i + P_{s_i}$

Неопределенность позиционирования - это разница между наибольшим и наименьшим вероятным значением измеренной величины. Только неопределенность позиционирования описывает истинную точность станка в данном положении при отсутствии нагрузок.

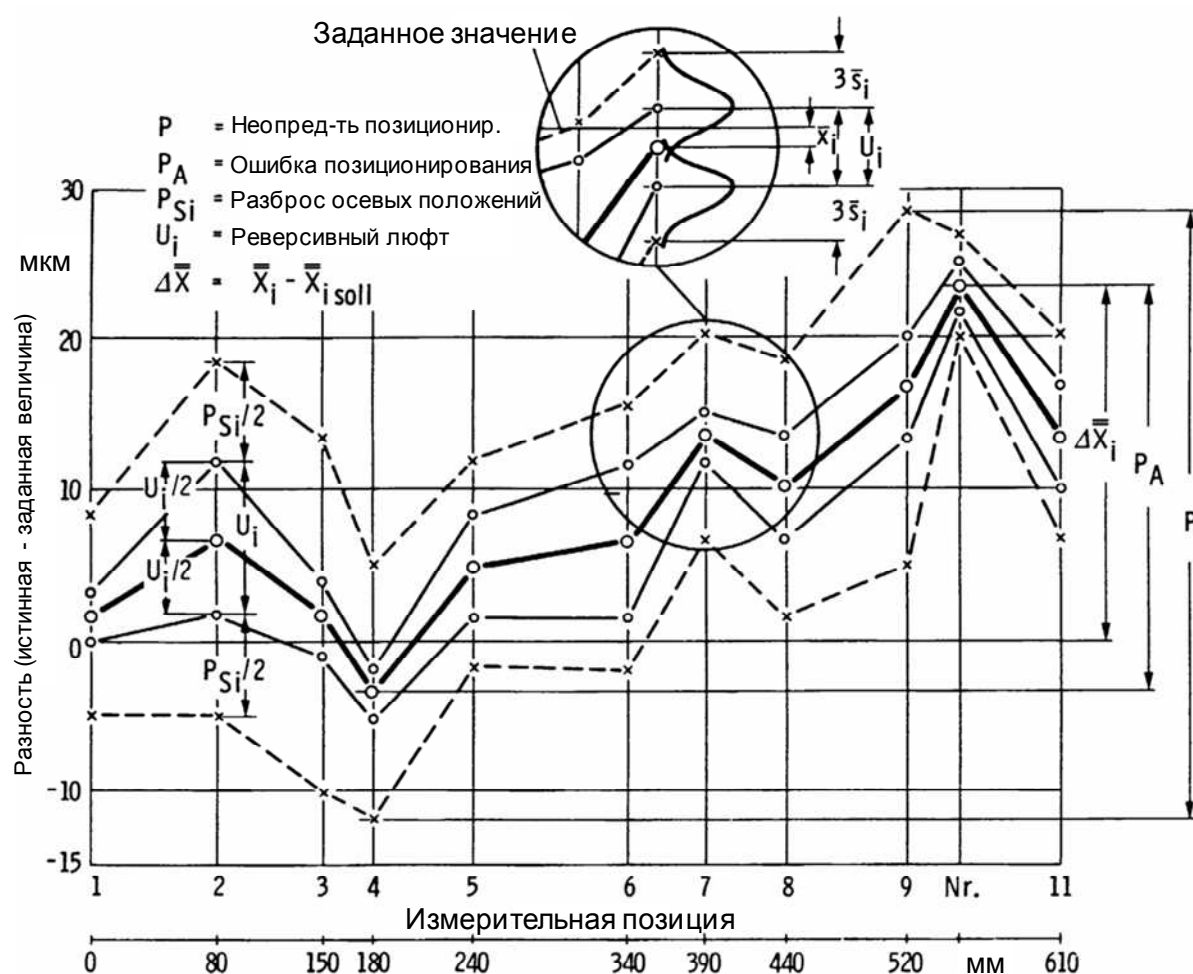


Рис. 7-10: Статистические характеристики нескольких измерительных позиций по контролируемой оси

Основные правила приемки станков сведены в отраслевые стандарты VDI/DGQ 3441 и ISO 230-2. На Рис. 7-10 графически показаны результаты измерений точности позиционирования по всей длине перемещения по одной из исследуемых осей подачи, а также их статистические характеристики, которые были описаны выше.

При проведении измерения точности позиционирования контрольные положения оси выбираются на неравном удалении друг от друга. Данное расстояние также не должно быть кратно ходу резьбы ходового винта, с тем, чтобы его периодическая ошибка была учтена в статистическом анализе результатов измерений. Для точного определения периодической ошибки хода шпинделя контрольные положения оси необходимо располагать на малом удалении друг от друга. На графике точками показаны действительные измеренные отклонения от идеального требуемого значения положения оси, описывающие:

- Систематические ошибки;
- Верхний и нижний предел люфта при смене направления движения;
- Верхний и нижний предел разброса значений;

Величина люфта при смене направления движения, а также разброс экспериментальных значений всегда располагаются симметрично к кривой систематических ошибок.

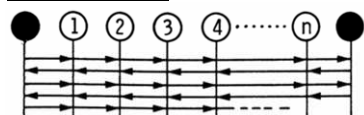
Кроме статистических параметров, рассчитываемых для каждого контрольного положения оси, из показанного графика определяются характеристики, описывающие точность перемещения по рассматриваемой оси. К ним относятся:

$P_A$ : Ошибка позиционирования. Определяется как разница между максимальным или минимальным значением и значением систематических ошибок для конкретного контрольного положения оси.

Р: Неопределенность позиционирования. Рассчитывается как разность между максимальным и минимальным значением разброса. Как было упомянуто ранее, только неопределенность позиционирования описывает истинную точность станка в конкретном контрольном положении оси при отсутствии внешних нагрузок.

### Преимущества и недостатки различных циклов

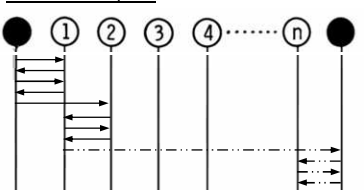
#### Линейный цикл



#### Линейный цикл

- + Контроль коротких перемещений, быстрота измерений
- Долгий подход к позициям измерения с двух сторон

#### Шаговый цикл



#### Шаговый цикл

- + Короткий подход к измерительным позициям с двух сторон
- Большие расстояния и длительность полной программы измерений
- Длительное время между измерениями в первой и последней позиции

Источник: ISO 230-2

Рис. 7-11: Различные циклы перемещение при проверке точности позиционирования

Из-за влияния внешних и внутренних источников тепла во время измерительных процедур, компоненты станка и измерительной системы подвергаются изменяющимся температурным деформациям, что отражается на результатах измерений. С учетом этого были разработаны различные методики проведения экспериментальных исследований точности позиционирования. Важным условием для всех методов измерения является исследование как можно большего количества контрольных положений оси, а также повторение измерения каждого контрольного положения оси не менее пяти раз (Рис. 7-11).

Часто применяемая методика линейных перемещений характеризуется малым расстоянием между соседними контрольными положениями оси и относительно коротким временем на проведение всей программы измерений. Температурное расширение структуры при данной методике измерений оказывает значительное воздействие на величину реверсивного люфта при изменении направления движения подачи и величину разброса экспериментальных данных. Это является следствием значительного времени, проходящего между последовательными перемещениями станка в одно и то же контрольное положение с разных сторон (положительное и отрицательное направление движения подачи).

Шаговая методика отличается коротким временем, необходимым для перемещения с разных сторон компонентов станка в контрольные положения. Однако продолжительность измерений между первой и последней контрольной точкой значительно больше, чем при методике линейных перемещений. Это приводит к тому, что температурные воздействия воспринимаются как систематическая ошибка позиционирования. Величины разброса и люфта при смене направления движения практически не подвержены температурным воздействиям.

## Содержание

- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

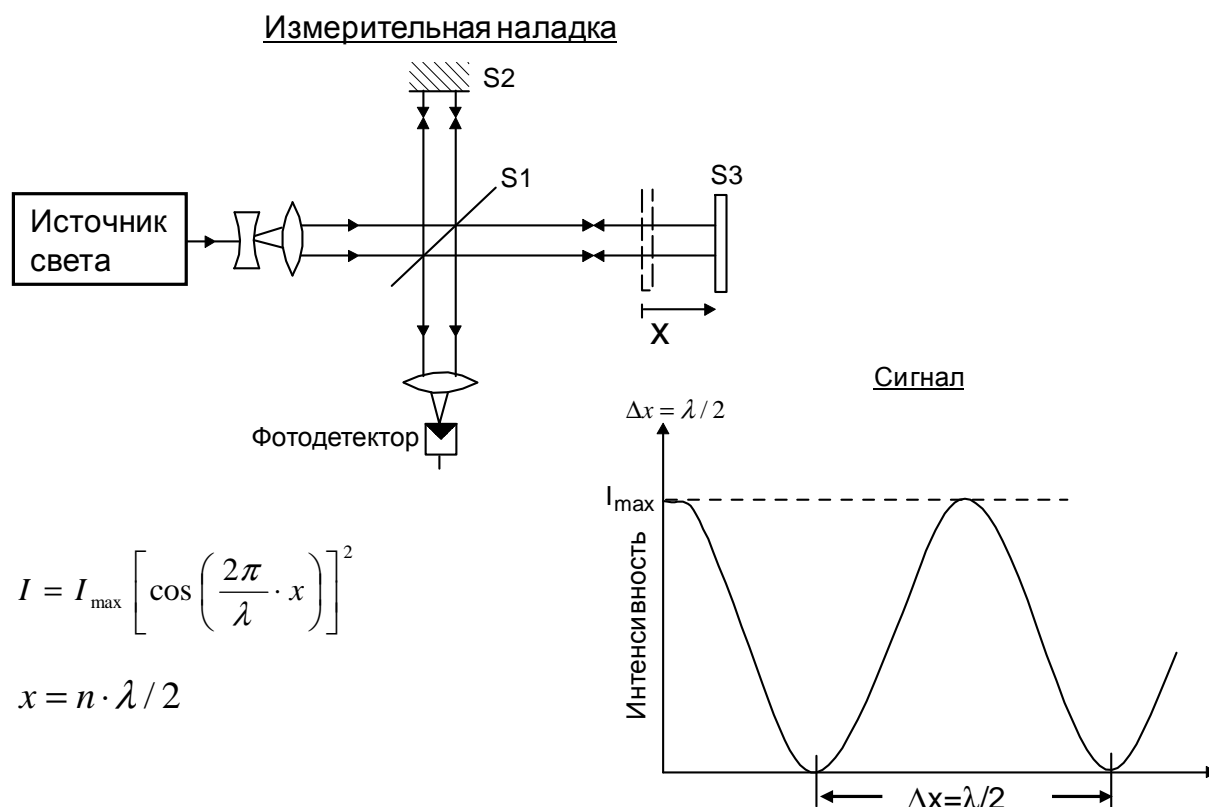


Рис. 7-12: Принцип работы интерферометра Майкельсона

Высокие требования к точности металлообрабатывающих станков обуславливают необходимость применения соответствующих средств, характеризующихся высокой точностью и воспроизводимостью результатов измерений. К ним относятся, среди прочих, оптико-электронные системы, например, лазерные интерферометры, осуществляющие измерения с высокой точностью и разрешением. Название «лазер» - это аббревиатура английского названия «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation». В переводе, лазер – усилитель силы света, работающий на основе возбуждения лучевой эмиссии. Широко распространенный газовый гелиево-неоновый лазер имеет длину волны 632,8 нм, располагающейся в красно-оранжевой зоне спектра. Лазерное излучение характеризуется высокой монохроматичностью и когерентностью. Данные свойства лазерного луча являются обязательными условиями для интерферометрического измерения расстояния. Монохромный свет состоит из электромагнитных волн одной частоты и длины ( $\lambda = \text{const}$ , свет одного цвета). Когерентный свет – это монохромный свет, в котором все электромагнитные волны имеют нулевой сдвиг фаз ( $\varphi = 0$ ). Расстояние между двумя точками в направлении распространения монохромного когерентного света, в которых наблюдается постоянство фаз электромагнитных волн, обозначается как расстоянием когерентности. Интерференцией называется взаимодействие электромагнитных волн с образованием новой волны, амплитуда и фаза колебаний которой зависит от взаимного положения фаз исходных волн и их амплитуды. Первые опыты по измерению расстояния с помощью интерференции были проведены еще в 1890 году профессором Майкельсоном. Разработанный им интерферометр применяется, практически, в оригинальном виде по сей день, составляя основу многих оптических измерительных приборов. Принцип работы интерферометра Майкельсона представлен на Рис. 7-12. Источник света генерирует монохромный, когерентный луч. При прохождении зеркала S1 луч разделяется на две части, которые движутся к зеркалам S2 и S3. Неподвижное зеркало S2 отражает луч на фотоэлемент, а подвижное зеркало S3 отражает луч назад на зеркало S1, через которое он направляется на второй фотоэлемент. Обе части луча интерферируют между собой. Суммарная интенсивность света превращается, с помощью фотоэлектрического эффекта, в электрическое напряжение. При

перемещении зеркала S3 параллельно оси распространения луча X наблюдается изменение интенсивности светового потока вследствие наложения волн обоих лучей, что ведет к усилению или затуханию световых волн. Фотоэлемент регистрирует изменение интенсивности светового потока и генерирует косинусный выходной сигнал, период которого равен сдвигу зеркала S3 на величину, равную половине длине волны используемого источника света. Данный сигнал оцифровывается, а полученные импульсы могут быть посчитаны, что позволяет определить величину перемещения  $x$ . Точность лазерного интерферометра зависит в значительной степени от стабильности длины волны лазерного луча. Последняя меняется под действием атмосферного давления, температуры и влажности воздуха, содержания  $\text{CO}_2$  в воздухе и состоянием самого лазера (нагрев до рабочей температуры и т.п.). Без учета этих факторов достижимая точность измерения составляет около 10 мкм/м. Измерение давления, температуры и влажности воздуха во время проведения измерений позволяет повысить точность до 1,5 мкм/м. Известны рабочие схемы для проведения измерений с помощью лазерных интерферометров, позволяющих добиться точности 0,1 мкм/м. Однако для их реализации требуются специальные условия. Воздействием самого лазера после достижения рабочей температуры на стабильность длины волны можно пренебречь. Одним из способов повышения стабильности длины волны лазерного луча является применение двухчастотного лазера. Благодаря автоматической стабилизации длины волны, время выхода на рабочую температуру значительно снижается и составляет для данного вида лазеров около 10 минут.

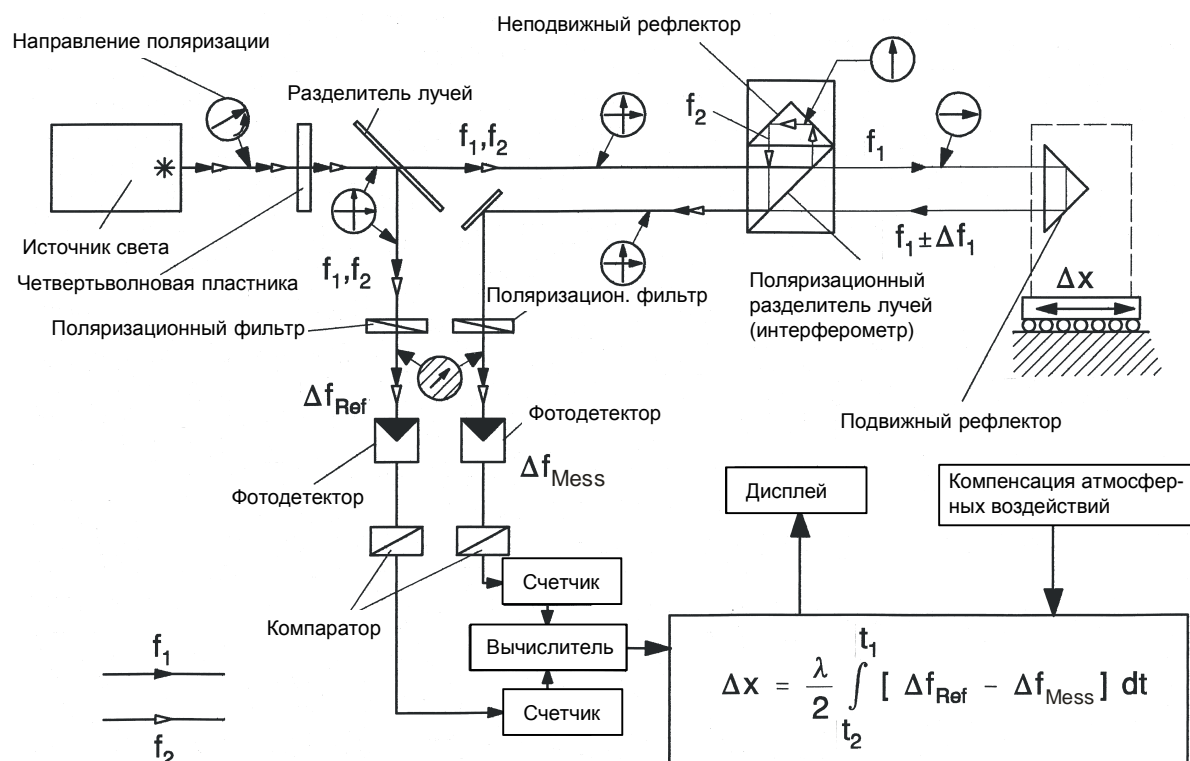


Рис. 7-13: Принцип работы двухчастотного лазера

Помимо повышения стабильности длины волны, применение двухчастотного лазера позволяет осуществить автоматическое распознавание направления движения исследуемого объекта. Принцип работы представлен на Рис. 7-13. При наложении внешнего магнитного поля, гелиево-неоновый лазер испускает квази-монохромный свет, состоящий из электромагнитных волн близкой частоты  $f_1$  и  $f_2$  ( $f_1$  составляет около  $0,47408343 \times 10^{15}$  Гц,  $f_2 \approx 1,8 \times 10^6$  МГц). Обе волны являются циркулярно-поляризованными. При прохождении через четвертьволновую пластину эти волны становятся поляризованными перпендикулярно. После прохождения через разделитель, часть обоих лучей направляется к фотозадающему элементу для создания сигнала сравнения. Для этого необходима интерференция обоих лучей, а она, в свою очередь, требует наличия, как минимум, одного общего компонента вектора напряженности поля. Перпендикулярно поляризованные лучи не могут интерферировать. Поэтому перед попаданием на фотозадающий элемент лучи проходят поляризационный фильтр, установленный под углом  $45^\circ$  к направлению распространения лучей, пропускающий только параллельные компоненты обоих лучей. После прохождения фильтра лучи интерферируют и попадают на фотозадающий элемент А, который генерирует электрический сигнал. Таким образом, создается сигнал сравнения, амплитуда которого меняется с частотой  $\Delta f_{\text{Ref}} = f_1 - f_2 (\approx 1,8 \text{ МГц})$ .

Большая часть лучей, генерируемых источником лазерного света, проходит через разделитель без преломления и разделяется на составные части. Последний характеризуется способностью пропускать и преломлять электромагнитные волны в зависимости от собственного направления поляризации. Так, обозначенный на рисунке компонент луча  $f_2$  преломляется на  $90^\circ$ , а компонент  $f_1$  пропускается без преломления. Компонент  $f_2$  попадает на жестко закрепленный рефлектор и возвращается на разделитель, где снова преломляется на  $90$  градусов. Компонент  $f_1$  попадает на подвижный рефлектор, отражается и, благодаря своему направлению поляризации, проходит через жестко закрепленный рефлектор без преломления. Начиная с прохождения неподвижного рефлектора, далее оба луча преодолевают одинаковое расстояние. Оба луча пропускаются через поляризационный фильтр, интерферируют и падают на фотозадающий элемент В. Если подвижный рефлектор не перемещался, частота сигнала на фотозадающем элементе В равна частоте на элементе А и составляет около  $1,8 \text{ МГц}$ .

Примененные в данной схеме рефлекторы состоят из трех зеркал, расположенных перпендикулярно к соседнему зеркалу. Благодаря этому выходящий луч всегда параллелен входящему лучу. Выверка установки рефлекторов производится только в направлении поступательного движения для задания параллельного смещения обоих лучей. При перемещении подвижного рефлектора частота компонента  $f_1$  меняется в соответствии с эффектом Доплера. Разница частот на фотоэлементах  $\Delta f_{\text{Mess}}$  выражается следующим образом:

$$\Delta f_{\text{Mess}} = (f_1 \pm \Delta f_1) - f_2 \quad (7-3)$$

Где  $\Delta f_1$  – доплеровское изменение частоты, являющееся функцией скорости перемещения  $v(t)$  подвижного рефлектора и длины волны  $\lambda$ .

$$\Delta f_1 = \frac{2}{\lambda} |v(t)| \quad (7-4)$$

Из уравнений (7-3) - (7-4) следует:

$$\Delta f_{\text{Mess}} = \Delta f_{\text{Ref}} \pm \frac{2}{\lambda} v(t) \quad (7-5)$$

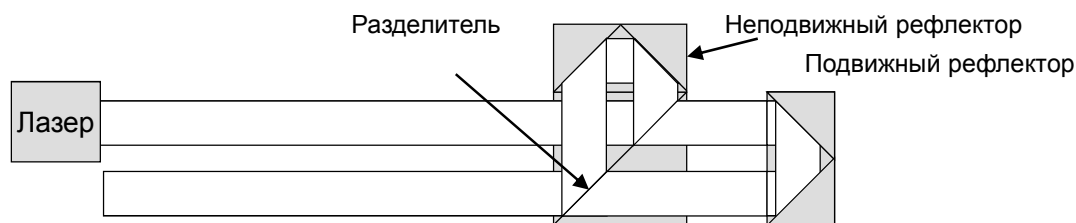
$$v(t) = \frac{\lambda}{2} (\Delta f_{\text{Ref}} - \Delta f_{\text{Mess}}) \quad (7-6)$$

Величина перемещения  $x$  подвижного рефлектора определяется путем интегрирования функции скорости  $v(t)$ .

$$\Delta x = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (7-7)$$

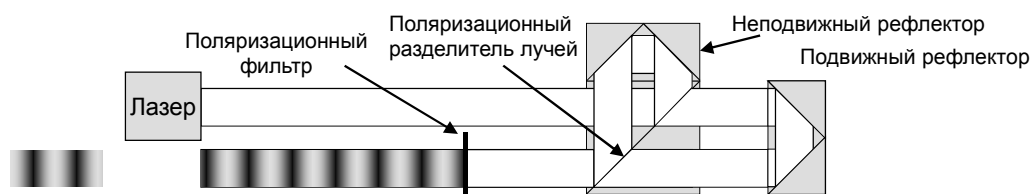
$$\Delta x = \frac{\lambda}{2} \int_{t_1}^{t_2} [\Delta f_{\text{Ref}} - \Delta f_{\text{Mess}}] dt = \pm \frac{\lambda}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Delta f_1 dt \quad (7-8)$$

При обработке цифровых сигналов аналоговое интегрирование замещается подсчетом числа импульсов, которые генерируются из измеряемых и отсчетных синусных сигналов с помощью компараторов. Количество импульсов сигнала сравнения и измеренного сигнала суммируются, а затем вычитаются, позволяя, таким образом, определить величину перемещения. Для компенсации атмосферных воздействий при окончательном расчете принимается корректировочный коэффициент  $K_{\text{luft}}$ . С его помощью, а также с применением длины волны  $\lambda_0$  в вакууме рассчитывается окончательное значение перемещения. Воздействия температурной деформации также может учитываться при расчете конечного значения перемещения. Для этого производится измерение температуры компонентов станка и передается в программу расчета параметров компенсации. Повышение частоты сканирования при измерении позволяет повысить разрешение сигналов до 5 нм. При использовании специализированной оптики, в которой измерительный луч перемещается между интерферометром и подвижным рефлектором несколько раз, можно добиться разрешения 1,25 нм, что является стандартом для современных систем. Измерения могут проводиться при максимальной скорости движения подачи 60 м/мин.



- Источник света излучает когерентный монохромный свет
- Разделитель расщепляет луч света
- После отражения от подвижного и неподвижного рефлектора лучи света интерферируют
- Интенсивность света зависит от положения подвижного рефлектора и повторяется с периодом  $\lambda/2$
- Определение направления движения с помощью данной системы измерения невозможно
- Применение данного вида интерферометров для измерений прямолинейности и точности угловых перемещений станков невозможно.

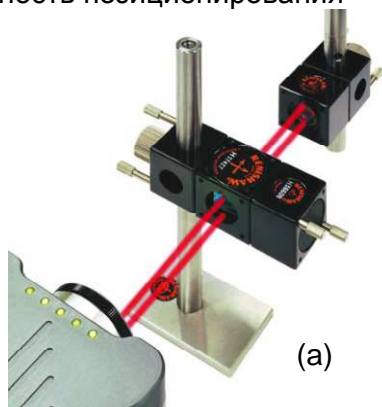
**Рис. 7-14: Изменение интенсивности света при измерении с помощью интерферометра Майкельсона**



- Источник света двухчастотного лазерного интерферометра излучает два поляризованных луча близкой частоты
- Поляризационный делитель лучей расщепляет световой пучок
- После отражения от неподвижного и подвижного рефлекторов лучи проходят через поляризационный фильтр и интерферируют
- При интерференции наблюдается модуляция световых волн, что ведет к колебанию интенсивности света с определенной частотой
- В зависимости от скорости подвижного рефлектора изменяется частота модуляции в соответствии с эффектом Доплера
- После установочного перемещения возможно определение направления и скорости перемещения. Положение определяется после интеграции

**Рис.7-15: Изменение интенсивности света при проведении измерений с помощью двухчастотного лазера**

## Точность позиционирования

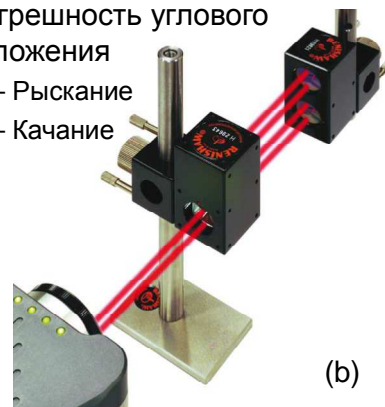


(a)

Область измерения:	до 80 м
Точность:	до 0,5 мкм/м
Разрешение:	до 1 нм

■ Погрешность углового положения

- Рыскание
- Качание



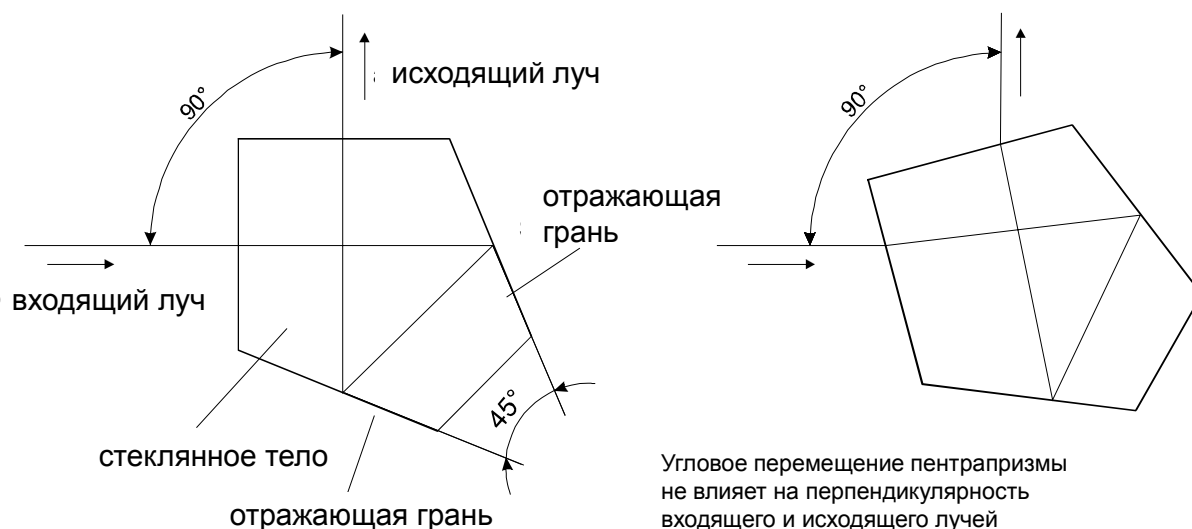
(b)

Область измерения:	от 15 м и 10 °
Точность:	< 3 мкм/м
Разрешение:	0,1 мкм/м

Источник: Renishaw

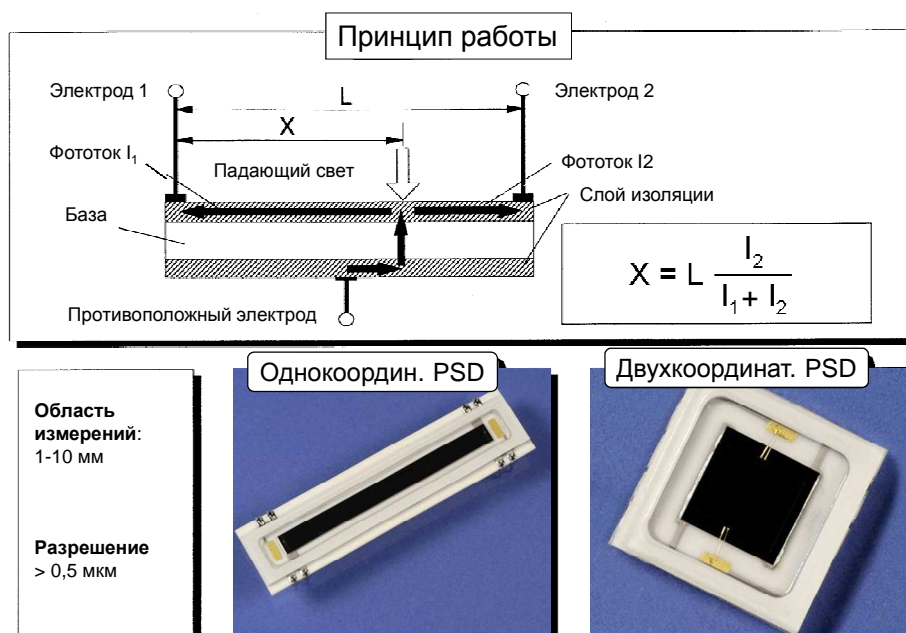
**Рис. 7-16: Определение точности позиционирования и угловой погрешности линейной оси**

На Рис. 7-16, b, показана наладка для измерения погрешности углового положения с помощью двухчастотного лазера. Особенностью измерительной схемы является направление обоих лучей после их разделения на двойной рефлексор, установленный на объекте измерения (например, ползуне станка). При исключительно поступательном перемещении, доплеровское смещение частоты между интерферометром и рефлексором для обоих лучей одинаково. При качательном движении рефлексора относительно интерферометра наблюдается доплеровское смещение частоты, по которому можно определить величину углового перемещения.



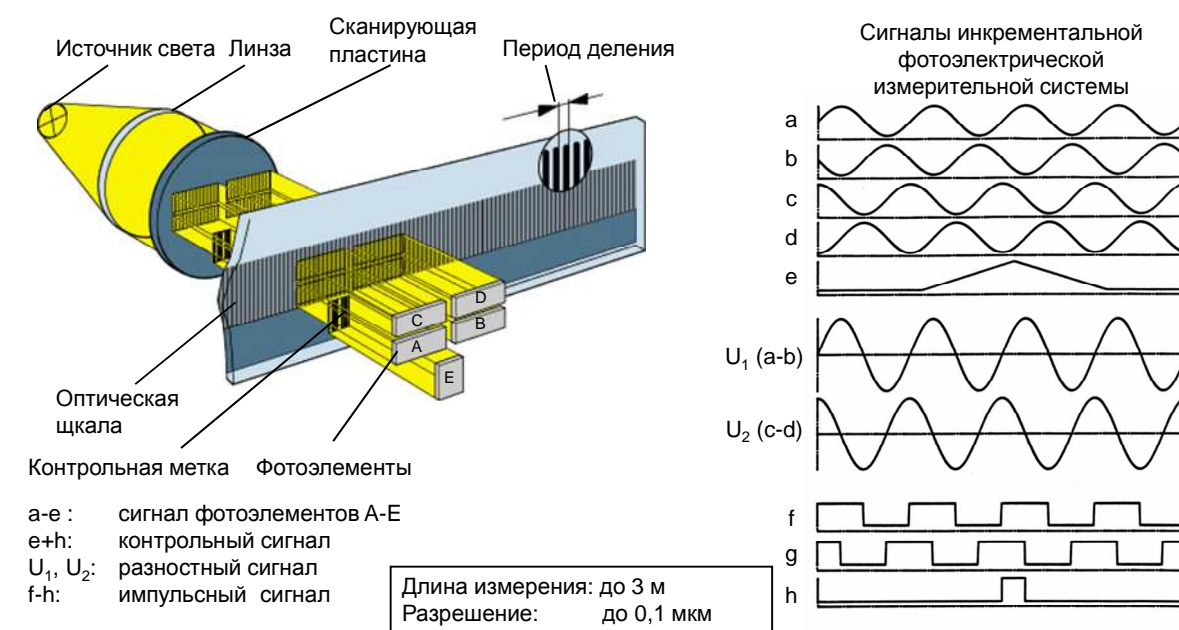
**Рис. 7-17: Геометрия и траектория луча при прохождении пентапризмы**

По аналогии с механическими шаблонами как массивные стальные плитки и угольники, для проведения оптических измерений также требуются вспомогательные устройства, преломляющие луч нормально к определенной базовой поверхности. На Рис. 7-17 показано устройство, позволяющее прямоугольное преломление произвольно падающих лучей. Две зазеркаленные грани пятиугольной призмы («пентапризма») расположены под углом  $45^\circ$ . При падении луча на одну из граней призмы, как это показано на левой стороне рисунка, выходящий луч будет переломлен по отношению к падающему на  $90^\circ$ . Небольшие угловые перемещение призмы не оказывают воздействия на перпендикулярность падающего и преломленного луча. С помощью пентапризмы проводятся многочисленные измерения геометрической точности станков.



**Рис. 7-18: Виды светочувствительных диодов (position sensitive device - PSD)**

Координатный светочувствительный диод состоит из фотодетектора большой площади, на верхней стороне которого нанесено специальное покрытие с гомогенным сопротивлением. Покрытие соединено с электродами  $I_1$  и  $I_2$ . На нижней стороне расположен третий электрод. При падении луча света на диод, в месте падения луча фоточувствительным материалом создается фототок, который течет через электроды, установленные на верхней стороне. Ток разделяется пропорционально отношению сопротивлений участков цепи до соответствующего электрода. Через отношения токов  $I_1$  и  $I_2$  можно определить положение точки падения луча. Размер светового пятна при этом не важен, т. к. для итогового соотношения двух возникающих фототоков, имеет значение единственно центр распределенной зоны генерирования фототока, которая возникает при увеличении площади пятна. Двухмерные фотодиоды позволяют определять положение светового пятна одновременно по двум осям. Различают конструкции двусторонних и четырехсторонних диодов. Последние характеризуются искажением коэффициентов соответствия в граничных областях, из-за которых их применимость для исследования станков ограничена. Для повышения их точности необходимо проводить калибровку.

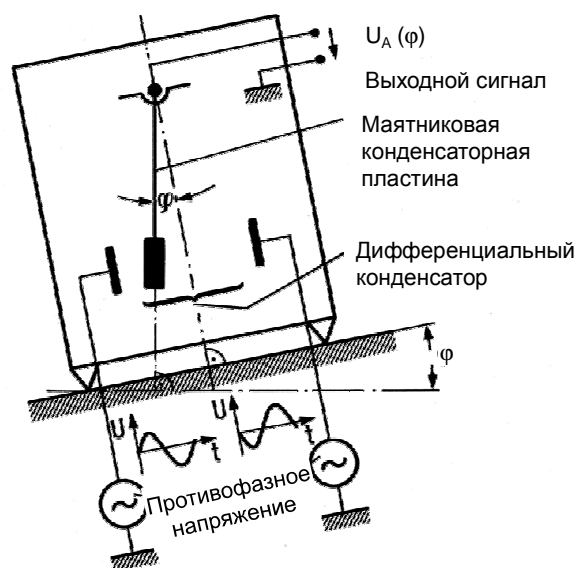


**Рис. 7-19: Фотоэлектрический принцип измерения с помощью оптической шкалы**

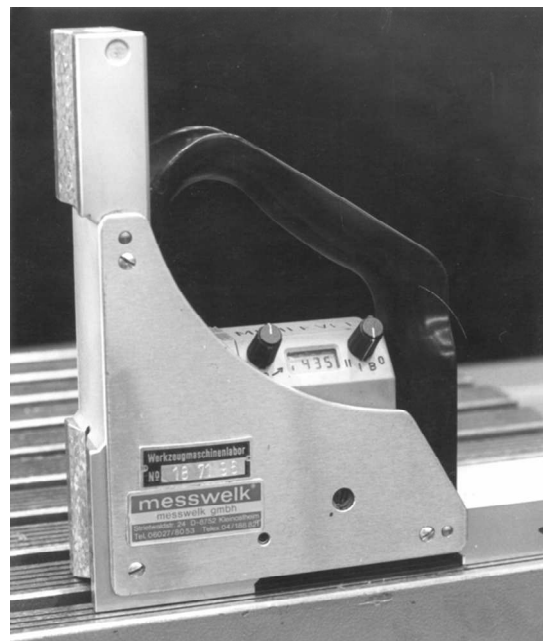
Для точного измерения положения линейных осей станков довольно часто применяются фотоэлектрические стеклянные штриховые шкалы. В мало- и среднегабаритных станках они применяются как эталонная измерительная система. Как правило, на их основе создаются цифровые измерительные системы для прямого контроля прямолинейных и вращательных перемещений по соответствующим осям станка. Работа таких систем осуществляется по фотоэлектрическому принципу (эффект Мойре). В основе данного принципа лежит создание штриховой фигуры, образующейся при прохождении светового потока через две параллельно установленные линейки с нанесенными на них штриховыми шкалами при их относительном перемещении. Шкалы состоят из светонепроницаемых штрихов и более широких светопроницаемых промежутков, имеющих суммарную ширину порядка  $\lambda = 10-40$  мкм, обозначаемой делительным периодом.

На Рис. 7-19 показан принцип работы стеклянной штриховой шкалы. Свет от источника света проходит через фокусирующую линзу, сканирующую пластину со штрихами и стеклянную штриховую линейку. Далее поток света попадает на фотоэлементы, расположенные напротив соответствующих штрихов сканирующей пластины. При перемещении стеклянной шкалы, в каждом фотодиоде наводится синусный электрический сигнал, накладываются на сигнал постоянного тока. С помощью двух линеек, сдвинутых на  $180^\circ$ , генерируются два сдвинутых по фазе синусных сигнала, разность которых уничтожает сигнал постоянного тока ( $U_1 = a - b$  и  $U_2 = c - d$ ). Две пары фотодиодов установлены с относительной разностью фаз в  $90^\circ$ , что позволяет распознать направление движения. Выходные сигналы также сдвинуты на  $90^\circ$  и симметричны относительно нуля ( $U_1$  и  $U_2$  на Рис. 7-19). Пятый фотодиод служит для сканирования контрольных отметок, однозначно определяющим «нулевое» положение начала отсчета.

Подсчет переходов через нулевую линию позволяет создать сигналы f, g, и h в исходной форме, которые, в зависимости от последующей интерпретации, позволяют достичь разрешения до  $\lambda/4$  ( $2,5 - 10$  мкм). Посредством интерполяции величина сдвига фаз аналоговых сигналов обрабатывается более точно, за счет чего достигаются разрешения в 40-1000 раз большие, чем четверть делительного периода – до 0,0025 мкм.



Источник: Wylter



**Рис. 7-20: Принципиальная схема работы электронного маятникового угломера**

На Рис. 7-20 показан прибор для определения величины наклона плоскости. С его помощью определяются величина наклона как горизонтальных, так и вертикальных плоскостей. Принцип работы основан на измерении смещения маятника от положения равновесия. Как показано на рисунке, компоновка прибора включает дифференциальный конденсатор, средняя пластина которого подвешена на маятниковой нити. На конденсатор подается переменное напряжение в противофазе, что в зависимости от положения средней пластины, воздействует на выходное напряжение  $U_A$ . Таким образом, генерируется выходной сигнал, пропорциональный углу наклона  $\varphi$  средней пластины. Величина угла наклона пересчитывается с помощью интегрированной электроники и выводится на дисплей прибора.

## Содержание

- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

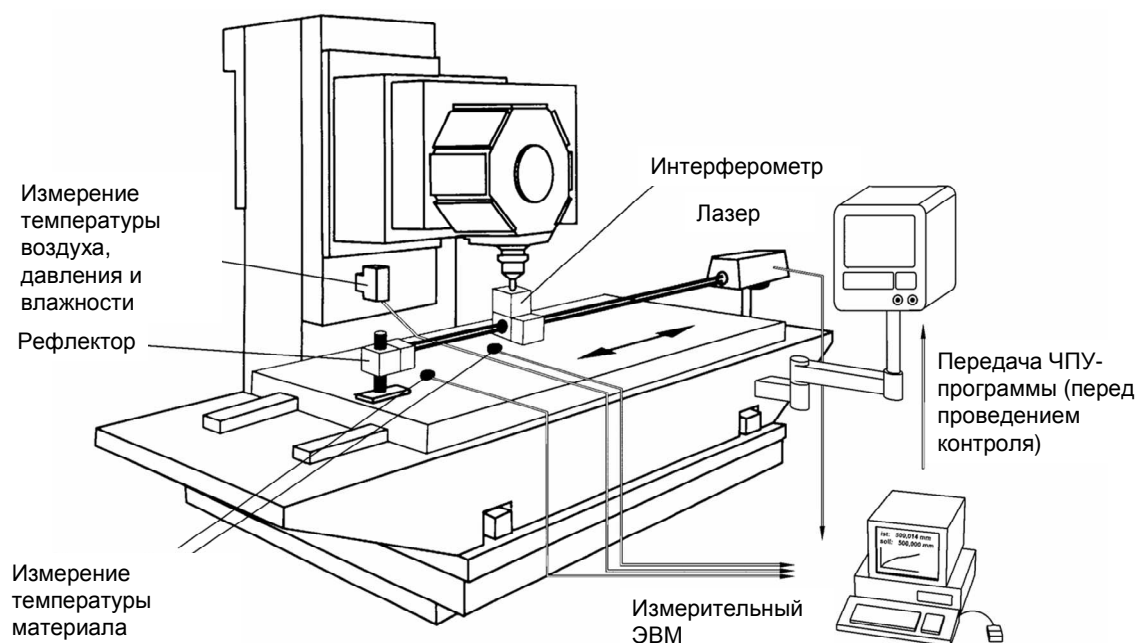


Рис. 7-21: Лазерный интерферометр. Измерение точности позиционирования обрабатывающего центра



Рис. 7-22: Лазерный интерферометр. Измерение точности позиционирования обрабатывающего центра

Для выяснения величины неопределенности позиционирования узлов обрабатывающего центра необходима представленная на Рис. 7-21 схема измерительной наладки. Процедуры и правила приемки станков перечислены в стандартах VDI/DGQ 3441-3445 и ISO 230. Современные измерительные системы позволяют реализовать не только полностью автоматизированную процедуру регистрации экспериментальных данных, но и значительно облегчают подготовку к проведению измерений. После задания траектории перемещения, контрольных точек положений оси, количества подходов к каждой точке и времени задержки станка на каждой контрольной точке (от 3 до 7 секунд), автоматически генерируется необходимая для выполнения измерений программа, которая передается системе ЧПУ станка. Для достижения высокой точности измерений производится постоянный контроль параметров окружающей среды и компенсация их воздействия на длину волны лазера с помощью ЭВМ измерительной системы. Кроме того, возможно произвести измерение температуры компонентов исследуемого станка и исключить вызванные их нагревом ошибки позиционирования. (Рис. 7-21 и Рис. 7-22).

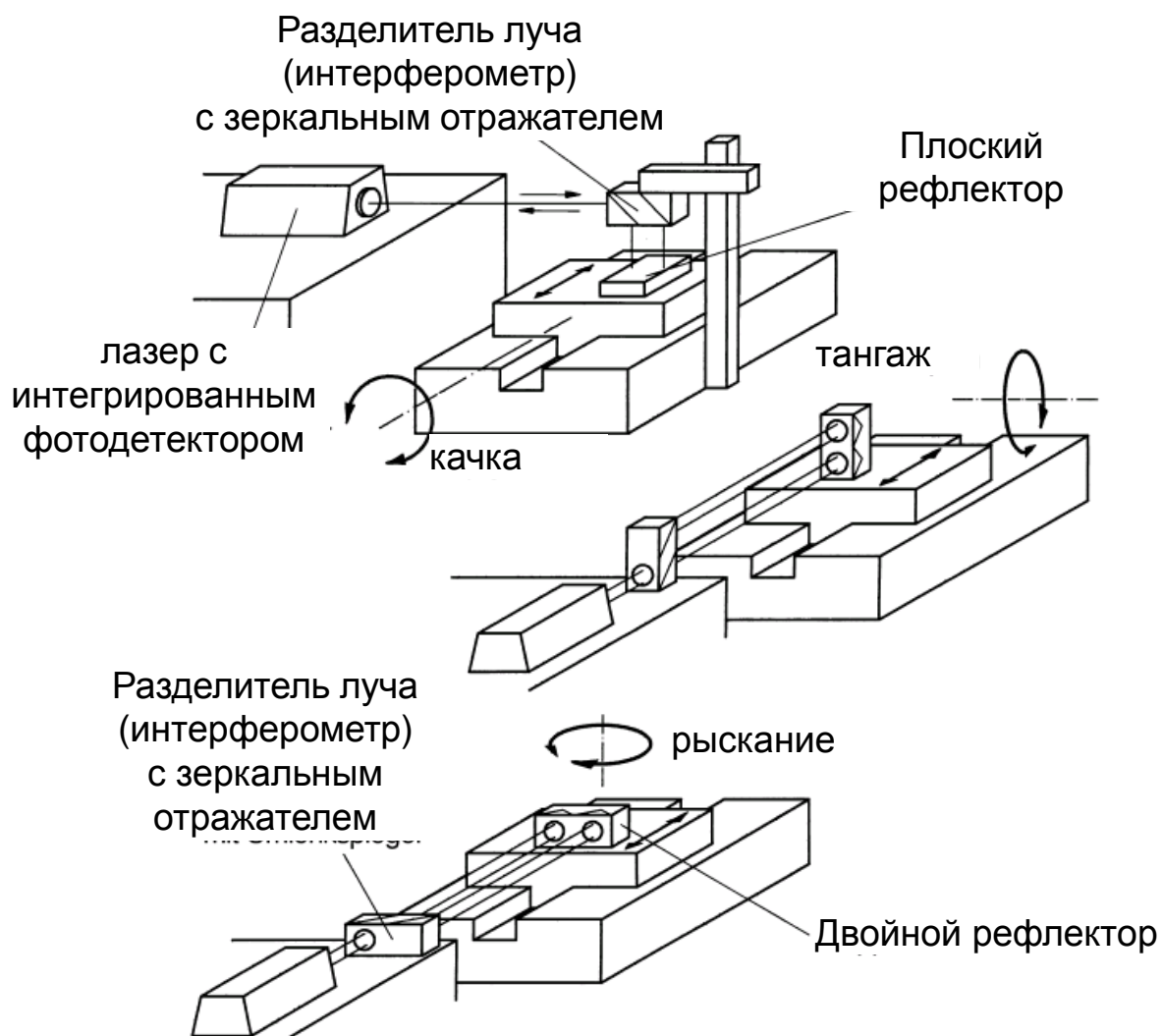
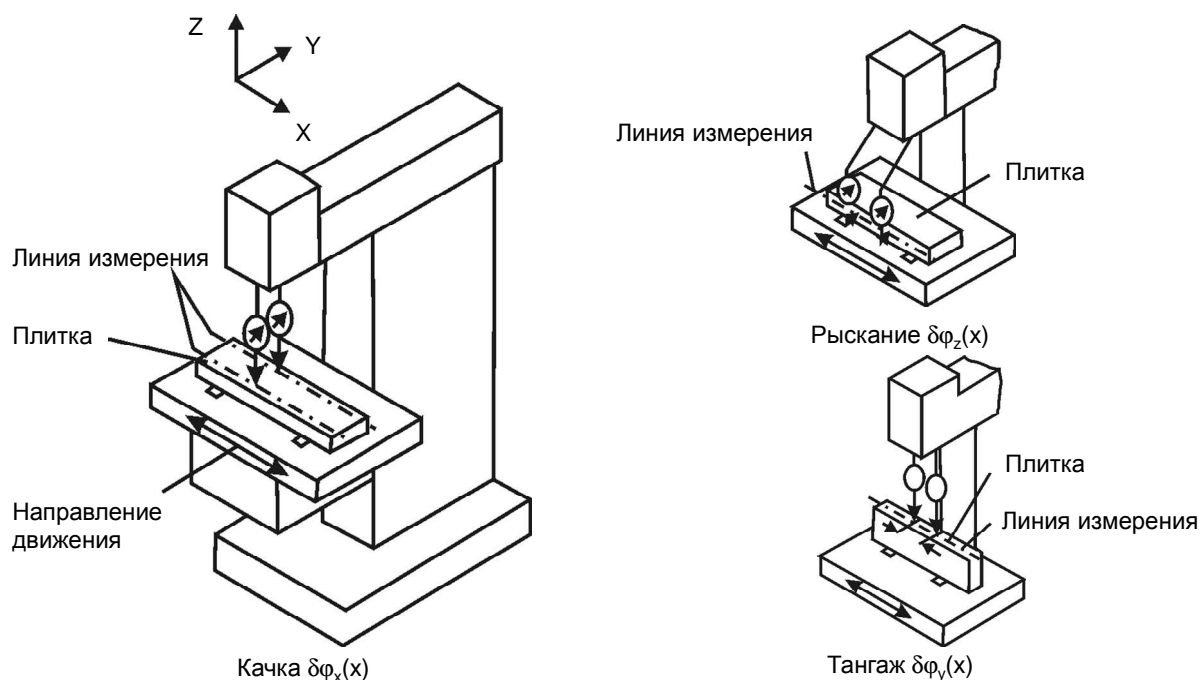


Рис. 7-23: Лазерный интерферометр. Измерение качки, тангажа и рыскания

На Рис. 7-23 показаны схемы установки контрольных инструментов для измерения угловых перемещений лазерным интерферометром. Применение разделителя луча, преломляющего зеркала и двойного рефлексора позволяет провести измерение величины тангажа и рыскания. Для измерения величины качки, на ползуне, вместо двойного рефлексора, требуется установить плоское зеркало. Применение данной измерительной наладки для определения погрешности качки на практике, однако, встречается довольно редко.



**Рис. 7-24: Измерительная наладка для определения величины ротац-онных погрешностей.**

#### Часовой индикатор и гранитная плитка

Показанные на Рис. 7-24 измерительные наладки включают поверочную плитку и часовые индикаторы для определения погрешности рыскания, тангажа и качки. Вместо механических индикаторов довольно часто применяются электронные датчики перемещения. Представленная схема позволяет также одновременно провести контроль прямолинейности. На левой стороне рисунка показано расположение измерительных инструментов для определения вертикальной прямолинейности.

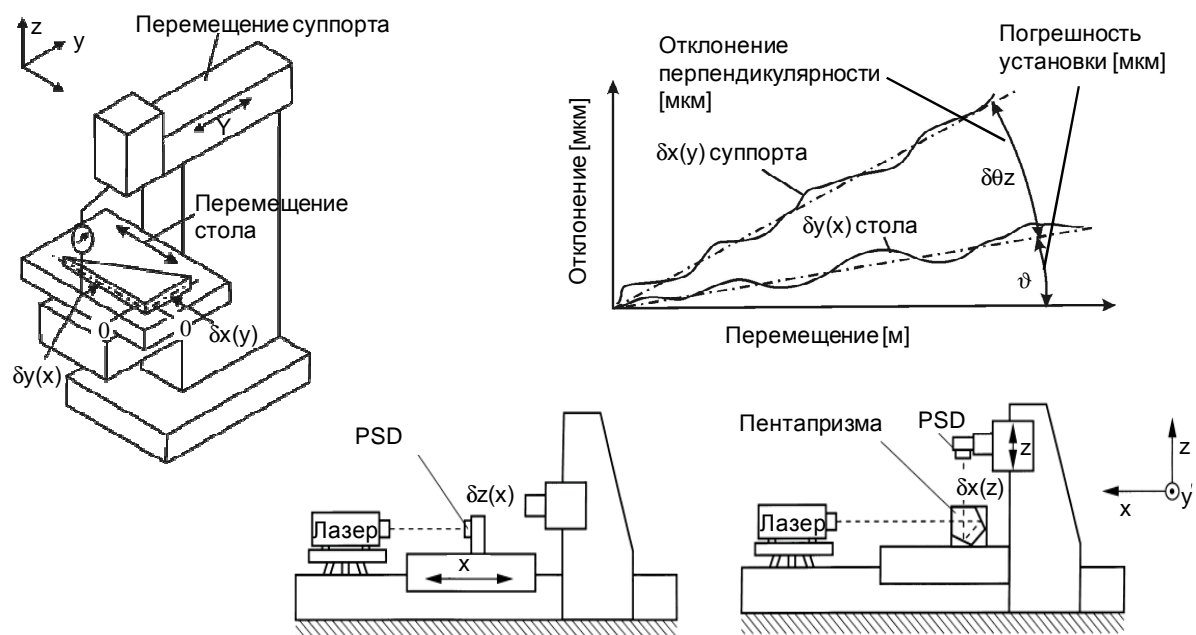
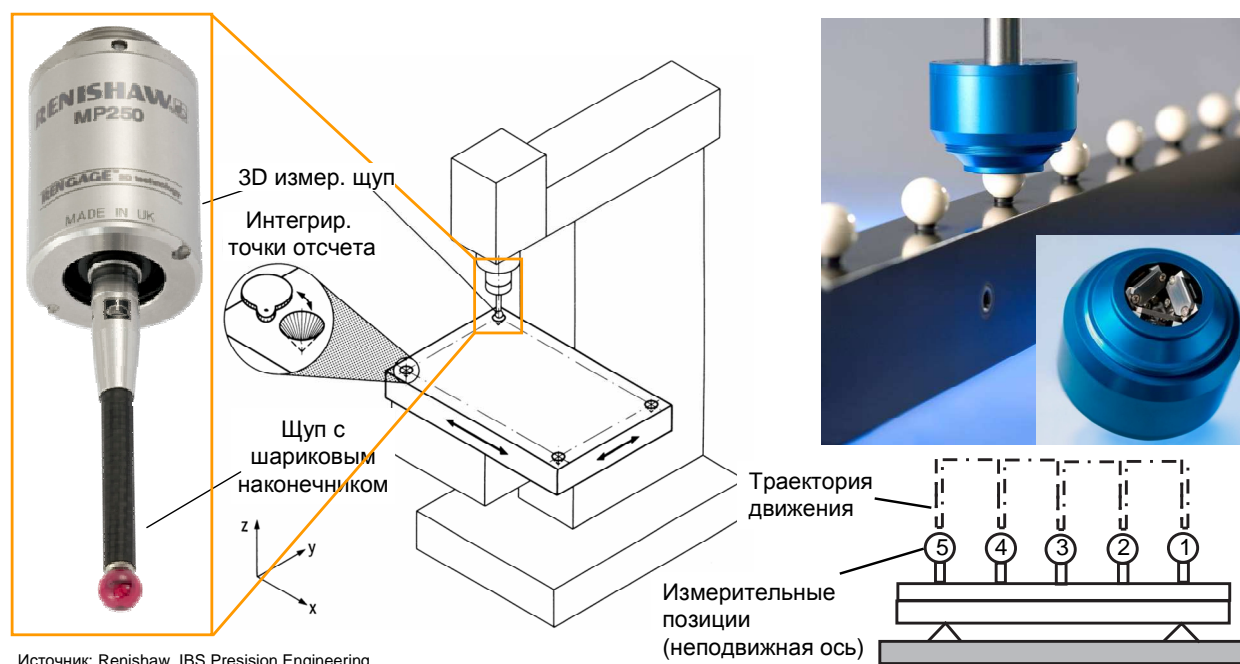


Рис. 7-25: Измерение перпендикулярности с помощью уголковой нормали и датчика перемещения.

#### Измерительная наладка на основе PSD)

Контроль перпендикулярности двух перемещений относительно друг друга может осуществляться с помощью методов, показанных на Рис. 7-25. Для измерения применяются либо индикатор и гранитный поверочный уголок, либо лазер, координатный светочувствительный диод и пентапризма. Для определения перпендикулярности проводятся измерения прямолинейности обоих движений, а результаты измерений выносятся на общий график. Разность угла наклона кривых соответствует ошибке перпендикулярности осей. Наклон кривых вызван не погрешностями станка, а возникает из-за неточности монтажа шаблона на столе, устранить которую практически невозможно.

При проведении измерений с помощью лазера, PSD-диода и пентапризмы, как показано в нижней части Рис. 7-25, сначала контролируется прямолинейность перемещения стола при движении по оси  $x$ . Координатный светочувствительный диод устанавливается на стол станка. Затем пентапризма устанавливается на неподвижный стол и используется для направления лазерного луча к вертикально перемещаемому ползуну, преломляя луч на  $90^\circ$ . Фотодиод закрепляется на ползуне. Таким образом производится измерение прямолинейности перемещения  $\delta x(z)$  ползуна. Результаты измерения заносятся в общую диаграмму. Ошибка перпендикулярности определяется как разность углов наклона экспериментальных кривых перемещения ползуна и стола.



**Рис. 7-26: Проверка точности станка посредством интегрированных точек отсчета, измерительных щупов и шариковой линейки**

На время проведения измерений станки выводятся из производственного процесса. Экономические потери из-за простоя и стоимость самих измерительных работ складываются в значительные суммы. Для снижения затрат, разрабатываются новые измерительные системы, позволяющие осуществлять быстрый контроль точности станка (Рис. 7-26). Интегрированные базовые точки отсчета, координаты которых с высокой точностью определяются при калибровке станка, применяются для проверочных измерений геометрической точности в процессе эксплуатации. В случае, если изменение геометрической точности превысит некоторую границу допуска, будет выдан сигнал о необходимости проведения повторной калибровки станка. Измерение координат базовых отсчетных точек производится с помощью измерительного щупа. Последний является распространенным технологическим вспомогательным средством и применяется для разнообразных видов измерений на станках. Для защиты точных поверхностей во время обработки базовые точки отсчета закрываются крышками. Еще одним вспомогательным средством для проверки точности является шариковая поверочная линейка, которая, в совокупности с гнездовым 3D-датчиком, позволяет произвести комплексное измерение погрешностей позиционирования и прямолинейности. Одновременное измерение нескольких параметров точности позволяет значительно снизить затраты на проведение контрольных операций. Недостатком данного метода является невозможность произвести измерения в точках с неравным удалением друг от друга. Точность повторяемости перемещений оси, несущей гнездовой трехмерный датчик, оказывает значительное воздействие на результаты измерений. Шариковые поверочные линейки изготавливаются в плоскостных и трехмерных исполнениях.

## Содержание

- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

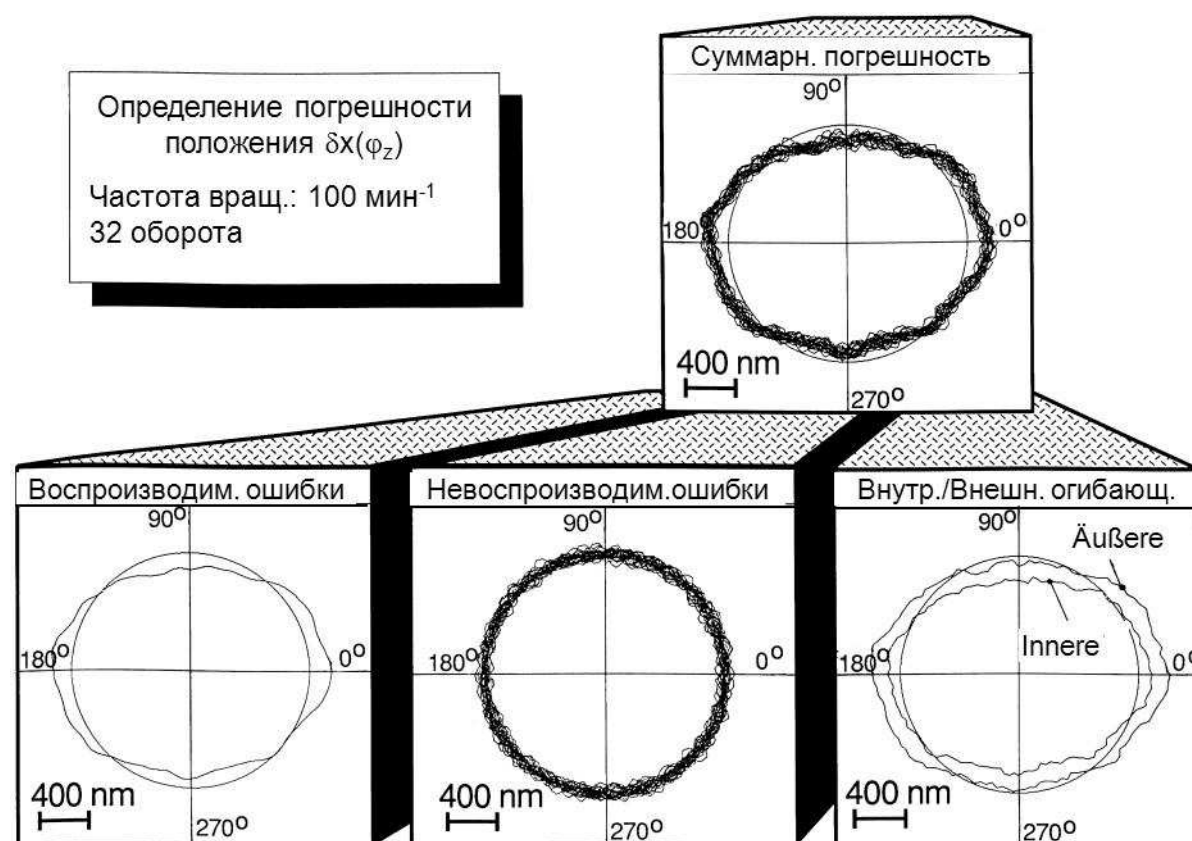


Рис. 7-27: Разложение геометрической погрешности вращения шпинделя на составляющие компоненты

В общем случае, измерение отклонений движения шпинделя от требуемой траектории осуществляется для большого числа полных оборотов шпинделя. Это позволяет выявить различные составляющие суммарной погрешности вращения шпинделя. На Рис. 7-27 показаны различные составляющие суммарной погрешности  $\delta x(\varphi_z)$ .

Суммарная погрешность включает систематическую (повторяющуюся) и случайную (неповторяющуюся) части. Систематические ошибки проявляются неизменно при каждом обороте шпинделя. Случайные ошибки характеризуются частотой, некратной частоте вращения шпинделя. К случайным ошибкам относятся как стохастические движения шпинделя, так и перемещения с фиксированной частотой, которая не меняется при изменении частоты вращения шпинделя.

Разложение суммарной ошибки на составляющие служит для оценки воздействия характеристик шпинделя на точность обработки заготовок. Расчет внешних и внутренних огибающих суммарной ошибки служит для оценки ожидаемых макроскопических отклонений круглости формы. Так, для сверлильных операций огибающие кривые позволяют оценить ожидаемые ошибки формы контура отверстия. Величина систематических ошибок позволяет, например, для операций внешнего точения на проход, оценить ошибку круглости профиля заготовки после обработки, а величина случайных ошибок дает возможность оценить ожидаемую шероховатость поверхности.

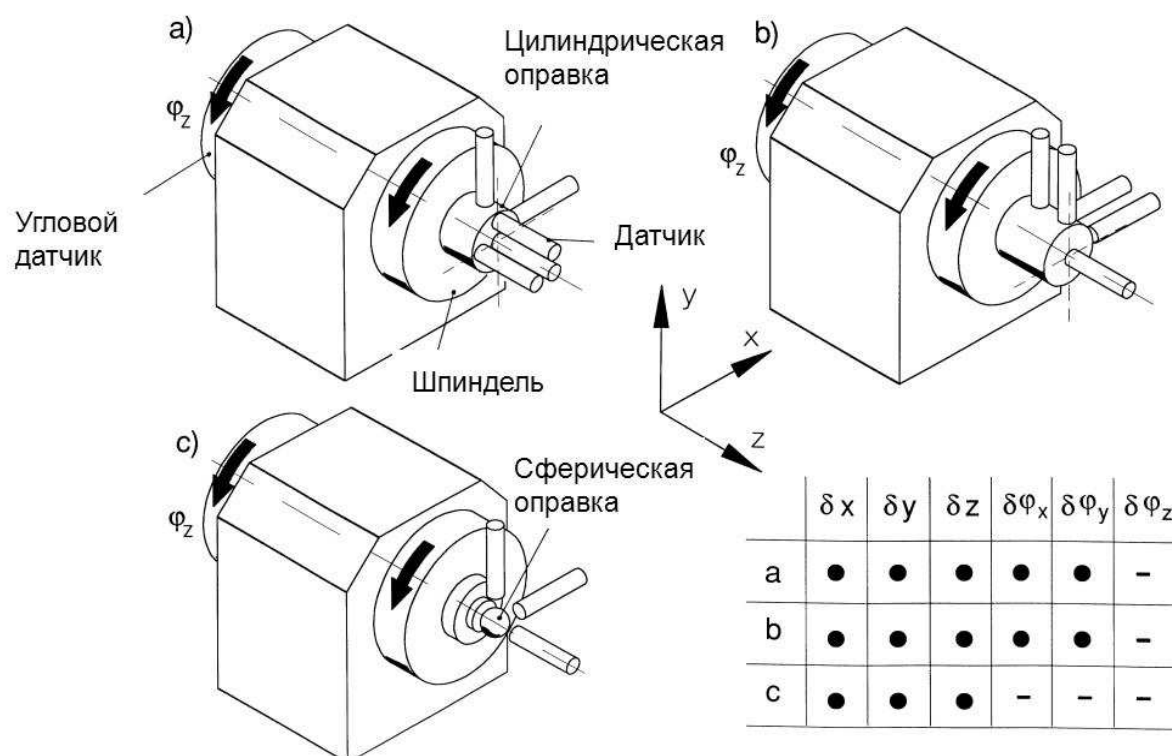


Рис. 7-28: Измерительная наладка со сферической и цилиндрической измерительной оправкой для ротационных осей

Для определения чисто геометрической погрешности оси вращения, отклонения формы и взаимного расположения компонентов в стыках должны быть либо пренебрежимо малы в сравнении с величиной погрешности вращения, либо их величина должна быть известна и технологически компенсирована. Широко распространенным способом контроля точности вращения шпиндельных узлов является применение высокоточных сферических и цилиндрических оправок, закрепленных в шпинделе. Рис. 7-28 Выбор оправки зависит от вида исследуемой геометрической ошибки. Для измерения угловых перемещений перпендикулярно к оси вращения необходимо применение цилиндрической оправки или оправки с плоским торцом. Данная схема измерений позволяет выявить ошибки с частотой, отличной от частоты вращения. Обнаружение погреш

ностей, имеющих частоту вращения невозможно, поскольку их нельзя однозначно отличить от погрешности установки контрольной оправки. На Рис. 7-28 показаны характерные схемы установки контрольных инструментов для измерения точности вращения шпинделей. Часто в данных исследованиях применяются бесконтактные датчики, измеряющие величину относительных перемещений между самим датчиком и оправкой. Применяются емкостные датчики и датчики вихревых токов. С их помощью возможно проводить исследования не только на малых, но и на номинальных частотах вращения.

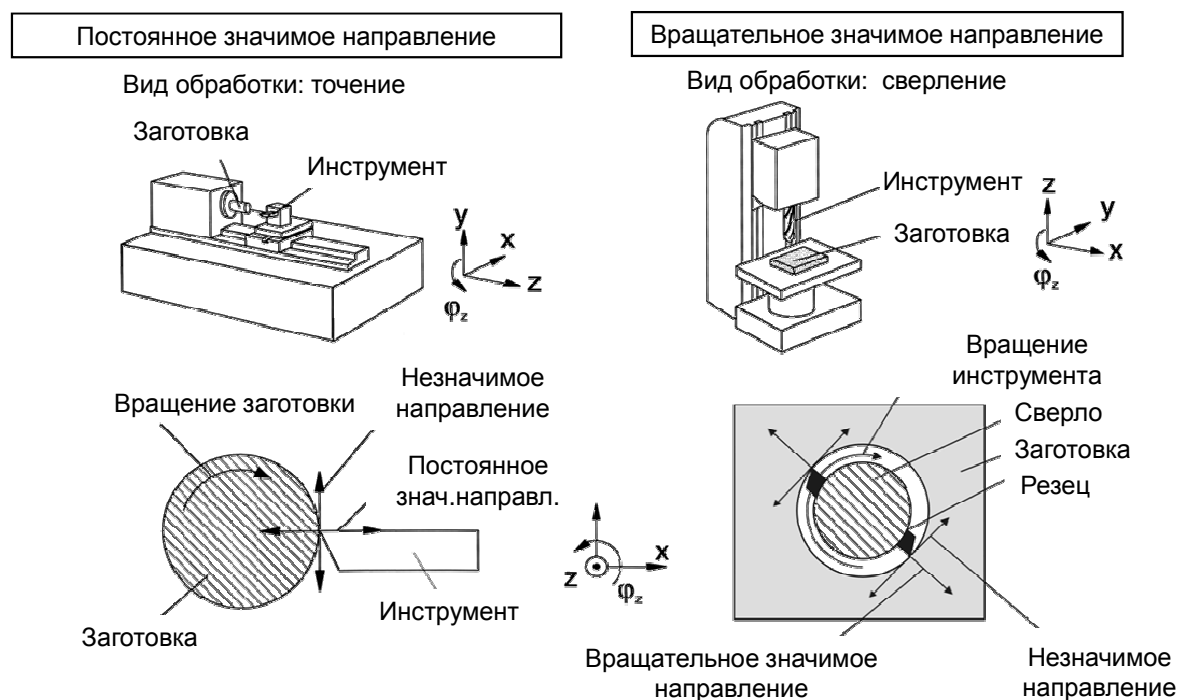
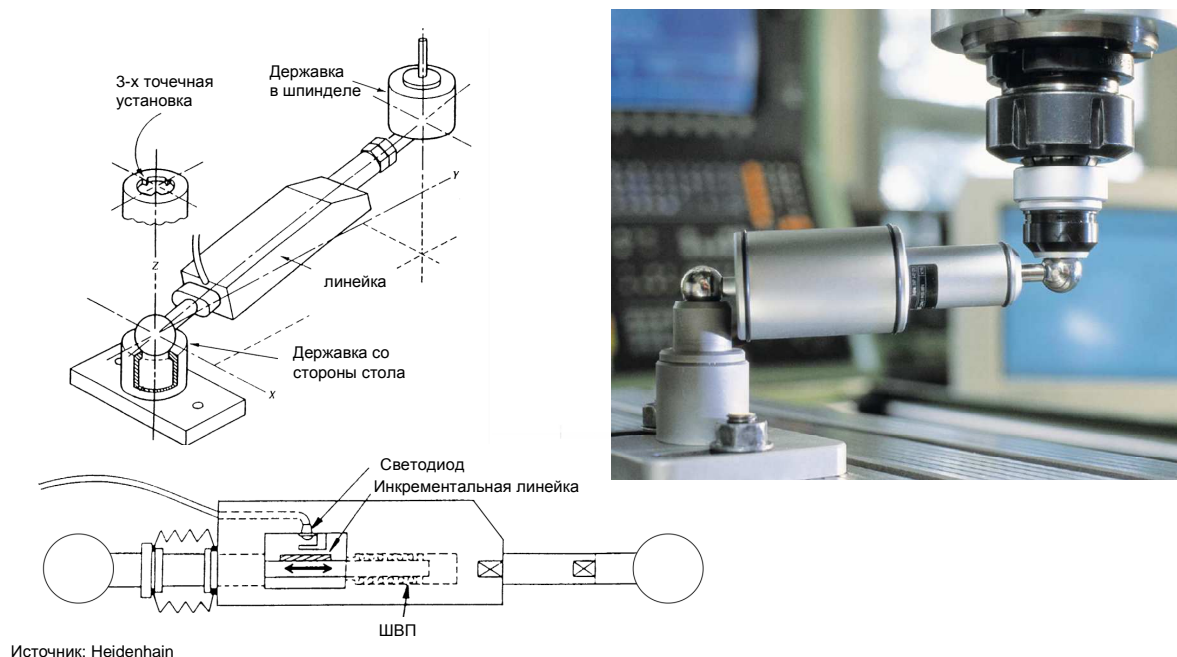


Рис. 7-29: Значимое и незначимое направления при точении и сверлении

Различные геометрические ошибки вращаемых осей имеют неодинаковое воздействие на качество обработанной детали в разных технологических процессах. При равной величине геометрических погрешностей перемещения по значимым направлениям оказывают непосредственное воздействие на толщину срезаемого слоя, в то время как движения по незначимым направлениям такого воздействия не оказывают. На примере токарной операции видно, что перемещения  $\delta x(\varphi_z)$  и  $\delta \varphi_y(\varphi_z)$ , имеющие долю перемещения по оси  $x$ , напрямую воздействуют на отклонение размера и формы диаметра заготовки, а также шероховатости поверхности. Напротив, перемещения по осям  $y$  и  $z$  непосредственно такого воздействия не оказывают. На Рис. 7-29 дано графическое представление значимых и незначимых направлений движения на примере токарной и сверлильной операции.

## Содержание

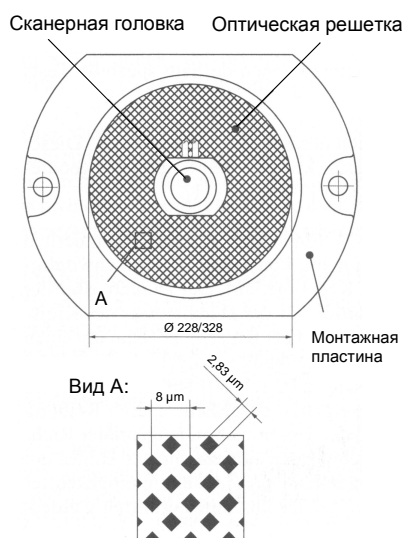
- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы техничеких измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение



Источник: Heidenhain

**Рис. 7-30: Телескопический датчик для проведения кругового теста**

На Рис. 7-30 показан телескопический датчик, закрепленный между столом станка и шпинделем, применяемый для контроля точности относительного перемещения компонентов станка по заданной идеальной окружности. Максимальный радиус окружности для проведения исследований ограничен длиной датчика и при применении специальных проставок составляет от 150 мм до 300 мм. Закрепление датчика между столом и шпинделем осуществляется с помощью трехточечных магнитных опор, удерживающих сферические наконечники датчика. В телескопическом цилиндре расположен датчик перемещения, измеряющий изменение расстояния между сферическими наконечниками. Перед проведением измерений производится юстировка оптической измерительной системы с помощью микромера или на координатно-измерительной машине. Для разграничения влияния отдельных осей на результаты измерения перемещение центра шпинделя по окружности осуществляется в одной плоскости. При перемещении шпинделя относительно центральной точки на столе станка по запрограммированной круговой траектории движения телескопический датчик регистрирует отклонения от заданной идеальной окружности. Результаты измерения выносятся на полярную диаграмму, позволяющую сделать предварительные выводы о наличии и причинах кинематических ошибок в перемещениях компонентов станка.



Источник: Heidenhain

**Рис. 7-31: Круговой тест с помощью оптической решетки**

Альтернативой применению телескопического датчика для измерения отклонения от заданной траектории перемещения является так называемая оптическая решетка (Рис. 7-31). Для проведения инструментального контроля применяется измерительная пластина с нанесенной оптической сеткой, над которой перемещается измерительная головка, измеряющая движения по двум направлениям. Измерение производится как со стеклянными шкалами - бесконтактно, по интерференционному принципу. Период деления оптической сетки составляет 8 мкм. При электронном увеличении достигается разрешение до 10 нм. Обработка результатов измерения производится с помощью специального программного обеспечения, как в системе с применением телескопического датчика. Отсутствие контакта между взаимно перемещаемыми поверхностями позволяет проводить измерения точности перемещений по окружностям диаметром от 115 мм до 1 мкм. Отклонения от заданной траектории движения могут измеряться для любых траекторий движения, например прохождение инструментом углов корпусных деталей. Кроме того, отсутствуют ограничения по скорости перемещений подачи, что выгодно отличает данную систему от телескопического датчика.

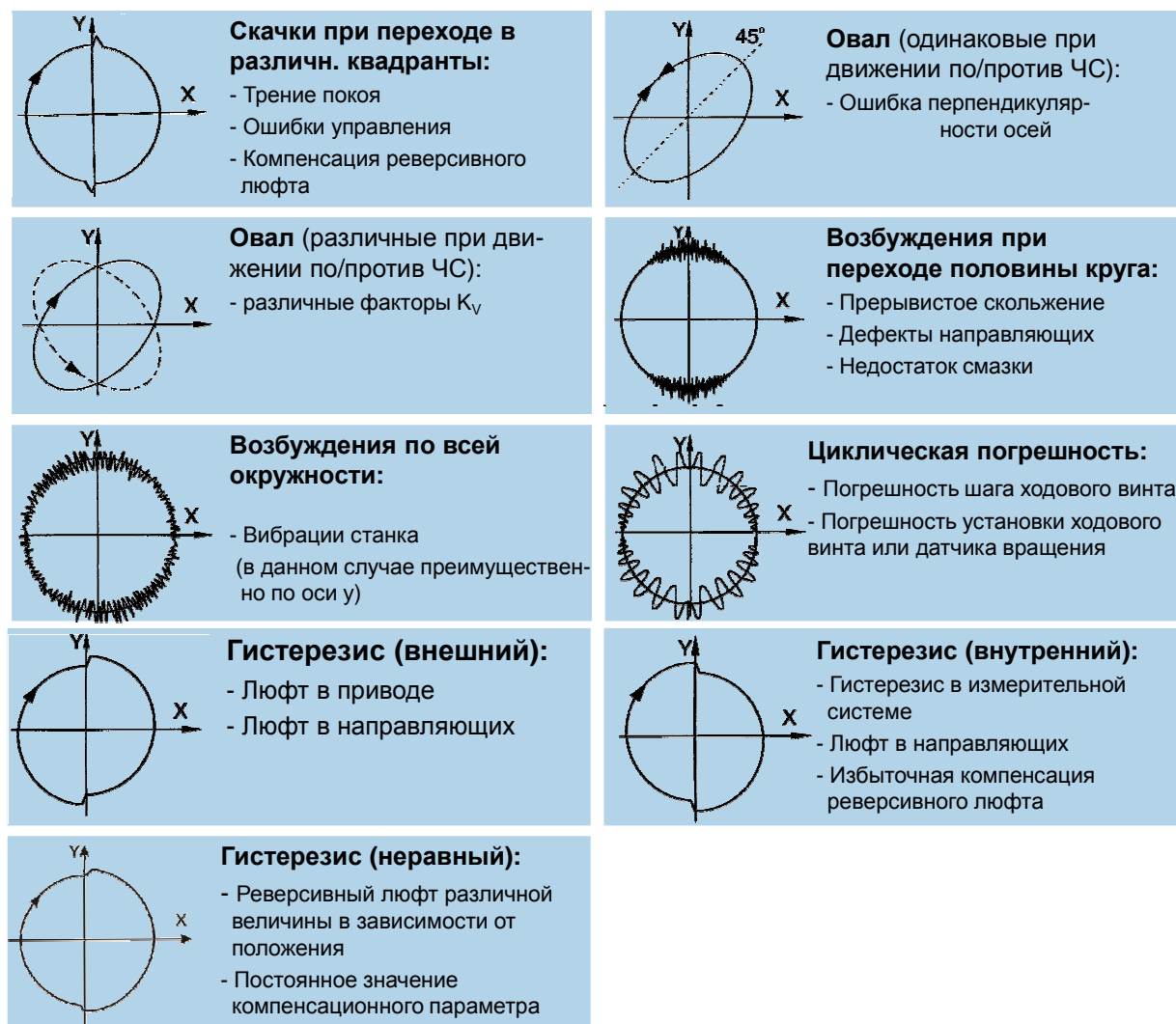


Рис. 7-32: Результаты кругового теста. Погрешности и их причины

Кинематические ошибки станка отражаются в отклонениях реальной траектории движения от идеальной заданной окружности. Часто определение истинных причин для установленных в результате измерения отклонений затруднительно, поскольку различные погрешности накладываются на результат измерения. Кроме того, различные причины возникновения погрешностей ведут к похожим отклонениям от идеальной окружности. Сравнение реальной траектории движения с типичными формами отклонений, причины которых достоверно известны, позволяет установить доминирующие источники кинематических погрешностей (Рис. 7-32).

## Содержание

- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

**Рабочие характеристики**

- Горизонтальный угол поворота:  $\pm 270^\circ$
- Вертикальный угол поворота:  $+75^\circ$  до  $-50^\circ$
- Макс. длина: 35 м

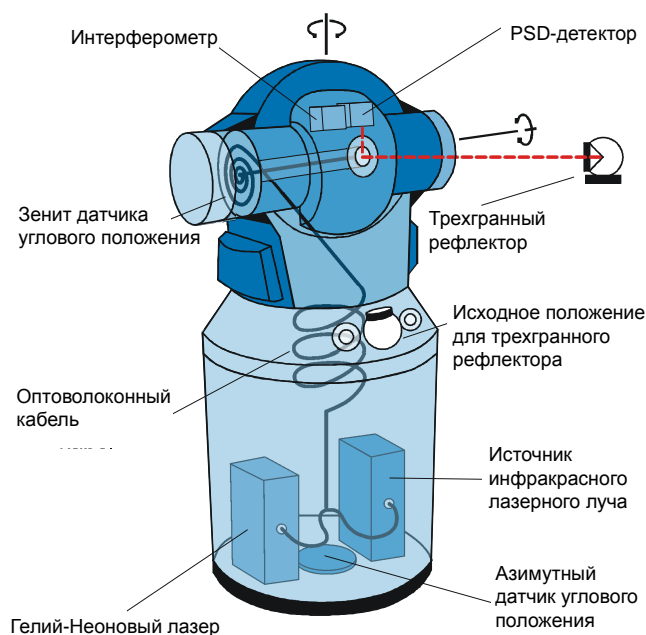
**Трехмерная точность измерений в одной точке**

- Зависит от длины луча:  
0,027 - 0,129 мм

**Точность по направлению луча**

- Интерферометр (HeNe-лазер)
  - Повторяемость: 1 мкм + 1 мкм/м
  - Абсолютная точность: 10 мкм + 0,8 мкм/м
- Устройство абсолютного дальномера (ADM, инфракрасный лазер)
  - Повторяемость: 7 мкм + 1 мкм/м
  - Абсолютная точность: 20 мкм + 1,1 мкм/м

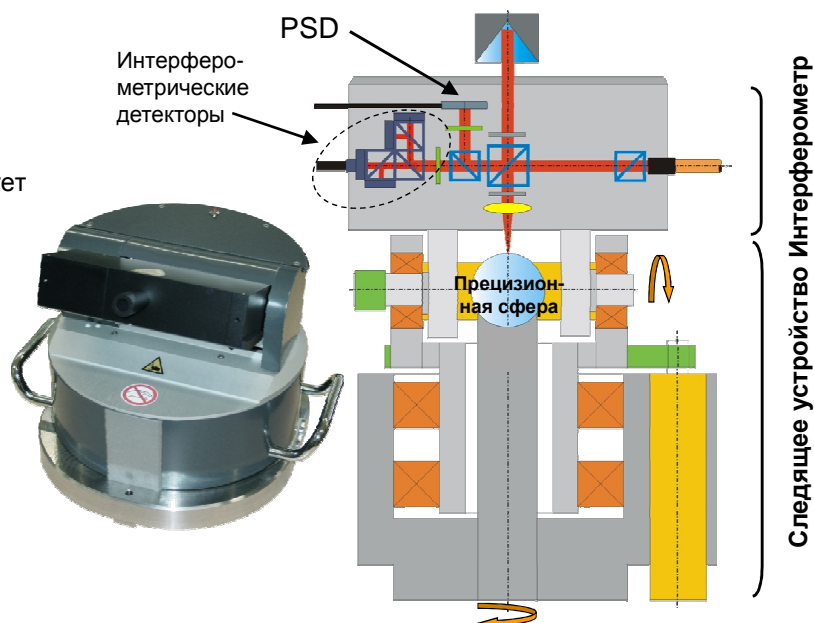
Источник: Faro

**Рис. 7-33: Устройство лазерного трекера. Точность измерения**

Дальнейшее развитие лазерных интерферометров, способных измерять расстояние до цели по одной прямолинейной оси, привело к созданию в начале 1990-х годов так называемых следящих интерферометров, также обозначаемых как сферокоординатные интерферометры или лазер-трекеры (Рис. 7-33). Следящий интерферометр закреплен на двух вращающихся осях, что позволяет устанавливать интерферометр в произвольное положение. Таким образом, путем измерения расстояния до цели и двух угловых положений с помощью следящего интерферометра возможно определение пространственных координат цели. Следящий интерферометр, как следует из названия, способен следить за целью, т.е. изменять угловое положение интерферометра для поддержания непрерывности лазерного луча между интерферометром и целью. При смещении трехстороннего зеркала от оси лазерного луча, последний отражается с двойным смещением. Повышение интенсивности возвращаемого светового пучка регистрируется с помощью координатного светочувствительного диода (PSD), который позволяет реализовать контур замкнутого регулирования углового положения интерферометра. Так как интерферометрическое измерение не является абсолютным, необходимо применение специальных устройств и последовательностей измерения для определения абсолютного расстояния. Для этого рефлектор может устанавливаться в специальный держатель в корпусе самого прибора (базовое положение – home position), координаты которого известны. В дальнейшем, при переносе рефлектора к непосредственной цели, установке и перемещении вместе с целью, изменение координат рассчитывается относительно держателя в базовом положении. Другой возможностью является применение системы для абсолютного измерения расстояния. Она включает внешний двухчастотный инфракрасный лазер, направляющий лучи переменной интенсивности на рефлектор. Система обработки сигналов рассчитывает приблизительное расстояние до цели на основе времени прохождения лучом расстояния до цели. Точное определение расстояния производится с помощью расчета сдвига фаз сигналов от двух лучей различной частоты. Преимущество системы для абсолютного определения расстояния до цели заключается в возможности прерывания луча и продолжения дальнейших измерений без возвращения рефлектора в базовое положение. Недостатком является относительно низкая точность. Точность трехмерного измерения координат цели зависит, в первую очередь, от точности измерения углового положения вращательных осей, которая, как правило, на порядки менее точна, чем точность измерения величины поступательных перемещений.

**Принцип работы**

- Поворот и наклон всего интерферометра
- Центр вращения интерферометра соответствует началу координат для всех измерений
- Область измерений: 6 м (при переустановке возможно увеличение)
- Точность:  $0,3 \text{ мкм} + 0,3 \text{ мкм/м}$
- Длительность измерения (включая установку) для рабочего пространства  $1 \text{ м}^3$  около 2 часов



Источник: Etalon

**Рис. 7-34: Устройство лазер-трейсера**

Специальным конструктивным исполнением следящих интерферометров является так называемый лазер-трейсер (Рис. 7-34). В конвенциональных следящих интерферометрах исходная точка отсчета, выполняющая роль неподвижного рефлектора, расположена на зенитной оси и перемещается при слежении за целью. Особенностью лазер-трейсера является наличие неподвижной прецизионной оптической сферы, расположенной в точке пересечения осей. В процессе эксплуатации производится измерение расстояния между центром сферы и рефлексом. Таким образом, точность измерения зависит только от точности изготовления сферы. Погрешности вращательных осей, как, например, эксцентриситет, биение, а также расстояние между осями (оси не пересекаются, а скрещиваются) не оказывают воздействия на точность измерения.

Положение объекта в пространстве определяется исключительно с помощью измерения расстояния от объекта до центра сферы лазер-трейсера, который устанавливается в различных положениях относительно измеряемого объекта. Также вместо переустановки одного прибора возможно одновременное применение нескольких лазер-трейсеров. Способ измерения обозначается как мультилатерация и аналогичен способу, применяемому определению местоположения с помощью GPS. Возможные расположения измеряемой точки при известном удалении от точки наблюдения образуют сферическую поверхность. При нескольких точках наблюдения измеряемые точки находятся на пересечении отдельных сферических поверхностей. При наличии трех точек наблюдения существуют два возможных местонахождения цели. При большем количестве точек наблюдения положение цели определяется однозначно.

Обработка экспериментальных данных производится с помощью специального программного обеспечения. С его помощью возможно определение геометрических и кинематических ошибок многокоординатных металлорежущих станков без предварительного точного определения положений наблюдения. Допускается последовательное выполнение мультилатерационных измерений, т.е. с применением одного измерительного прибора, как было описано выше. Программное обеспечение позволяет работать как с лазер-трейсером, так и с обычным лазерным интерферометром.

## Содержание

- 1 Требования к методам технического контроля точности станков
- 2 Основы технических измерений. Виды погрешностей
- 3 Средства контроля
- 4 Проверка геометрической точности линейных осей станка
- 5 Проверка геометрической точности ротационных осей станка
- 6 Проверка кинематической точности
- 7 Контроль точности следящим интерферометром
- 8 Заключение

- Точность работы станков является важнейшим качественным параметром, наряду с надежностью и экологичностью
- Точностные параметры станков определяются качеством монтажа и точностью отдельных компонентов
- Геометрические и кинематические погрешности определяют уровень точности станка
- Каждая ось станка характеризуется 6-ю геометрическими погрешностями, соответствующими 6-и степеням свободы
- Для определения величины данных погрешностей существуют стандартизированные методы технического контроля
- Для проведения измерений применяются лазерно-интерферометрические, фотоэлектрические и тактильные сенсоры
- С помощью оптической решетки или телескопического датчика возможно определение отклонений от перемещений по круговой траектории
- Применение современных оптических измерительных систем позволяет одновременный контроль нескольких параметров и объемную компенсацию возможных погрешностей