

Современные интерференционные  
измерительные системы для  
контроля точности станков,  
координатно-измерительных  
машин и других систем линейных и  
угловых измерений

ФГБОУ ВО «МГТУ «Станкин»

Кафедра измерительных  
информационных систем и  
технологий

# Интерференционные измерительные системы

- Интерференционные измерительные системы (ИС), применяемые для измерения линейных и угловых перемещений в машино- и приборостроении, научных исследованиях и разнообразных областях техники, основаны на явлении **интерференции** или сложения когерентных световых волн.

# Интерференционные измерительные системы

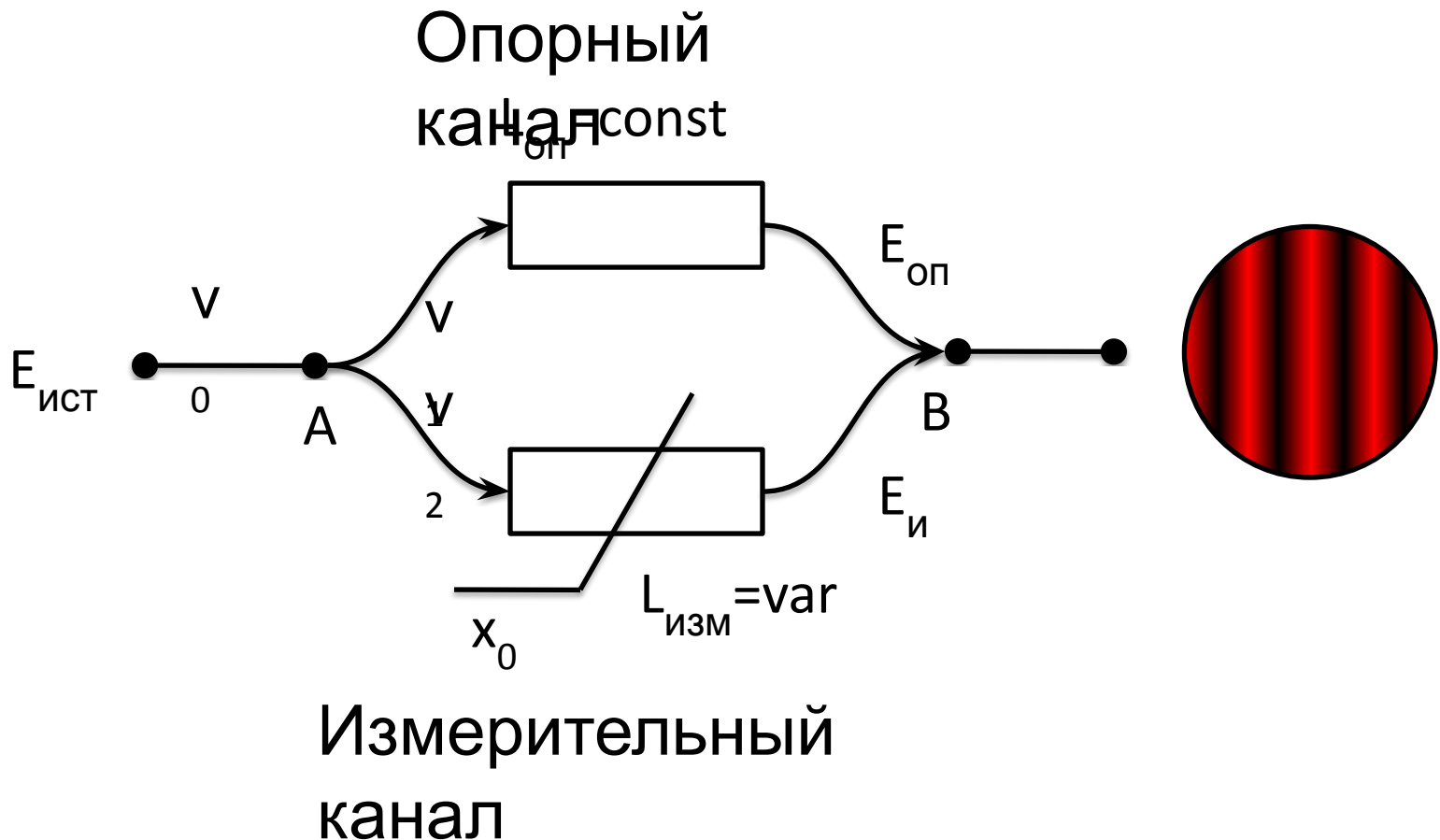
Световые волны представляют собой гармонические электромагнитные колебания, несущие информацию о геометрических свойствах контролируемых объектов в различных своих параметрах:

- интенсивности;
- амплитуде;
- частоте
- фазе;
- поляризации

# Интерференционные измерительные системы

- Особенностью ИС является образование пространственных оптических периодических структур, положение которых зависит от **разности фаз** интерферирующих световых волн.
- Различают двухлучевые и многолучевые схемы ИС
- В рассматриваемой нами области применения используются двухлучевые схемы интерференции.

# Схема двухлучевой ИС



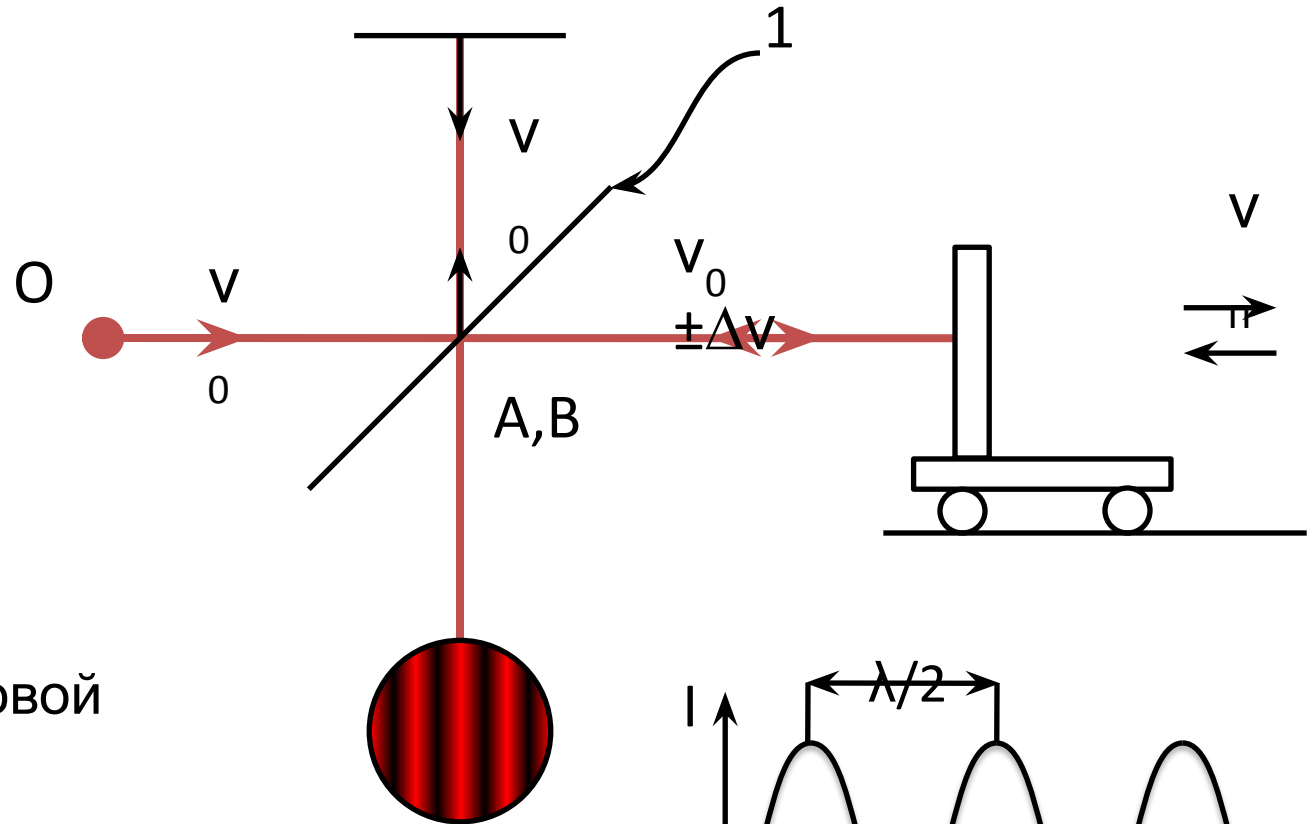
# Интерференционные измерительные системы

- ИС, предназначенные для измерения перемещений, базируются на фотоэлектрической регистрации поля интерференции двух когерентных световых волн, одна из которых имеет неизменную пространственную фазу и называется **опорной** (референтной) волной, а другая, называемая **измерительной** (сигнальной) – фазу, изменяющуюся пропорционально контролируемому перемещению.

# Интерференционные измерительные системы

- Таким образом, схема ИС предполагает разделение исходного излучения с оптической частотой  $\nu_0$  на 2 световых пучка в точке А, прохождение этими пучками своих оптических путей по измерительному и опорному каналу и последующей их интерференции в точке В.
- Существует много способов разделения и сложения световых пучков (бипризмы Френеля, зеркала Ллойда и др.), однако в промышленных интерферометрах для измерения перемещений в станках и КИМ доминирует схема интерферометра Майкельсона (1852 – 1931 г.)

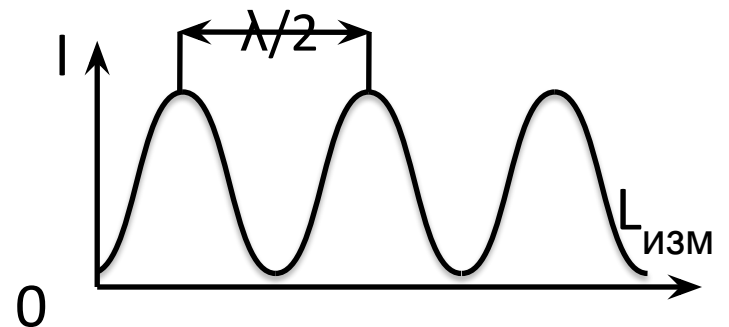
# Классическая схема интерферометра Майкельсона



$\lambda$  – длина световой волны

(для He-Ne лазера

$\lambda = 0,6328$  мкм)





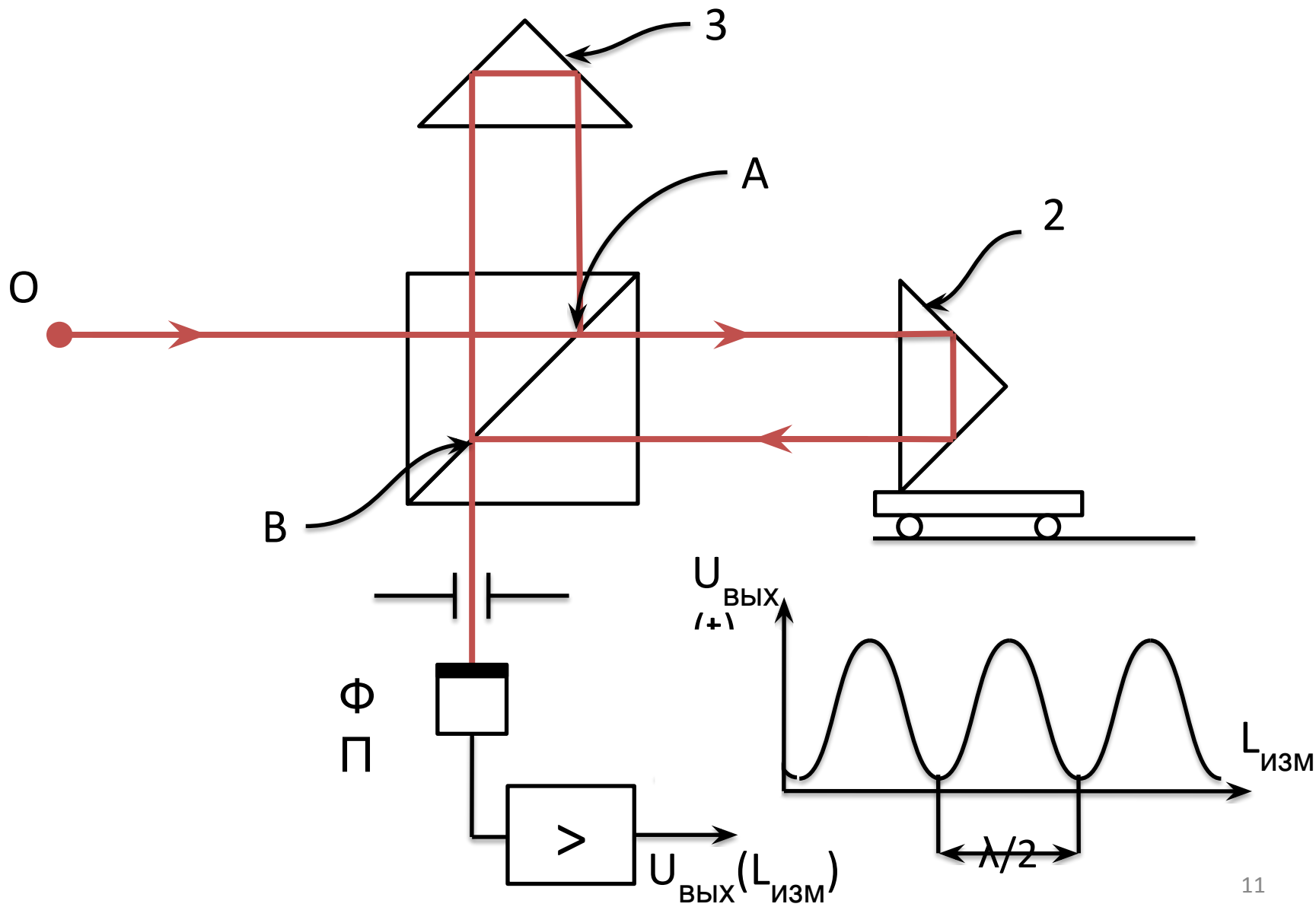
# Интерферометр Майкельсона

- Особенность схемы Майкельсона заключается в том, что в качестве элемента, на котором происходит разделение исходного светового пучка на 2 плеча и последующее сложение интерферирующих пучков, используется полупрозрачное зеркало 1.
- В схеме на слайде 8 точки А и В совпадают.
- В точке В возникает картина интерференции, распределение интенсивности в которой показана на графике  $I(L_{\text{изм}})$

# Интерферометр Майкельсона

- Реальные ИС по схеме Майкельсона с фотоэлектрическим преобразованием измерительной информации строятся по следующей схеме (слайд 11).
- Вместо полупрозрачного зеркала 1 используется светоделительный кубик 1, а вместо отражающих зеркал – призмённые ретрорефлекторы (триппель-призмы) 2 и 3.
- Точки А и В схемы пространственно разнесены.

# Интерферометр Майкельсона

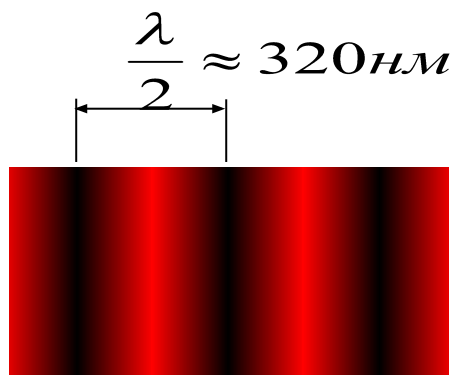
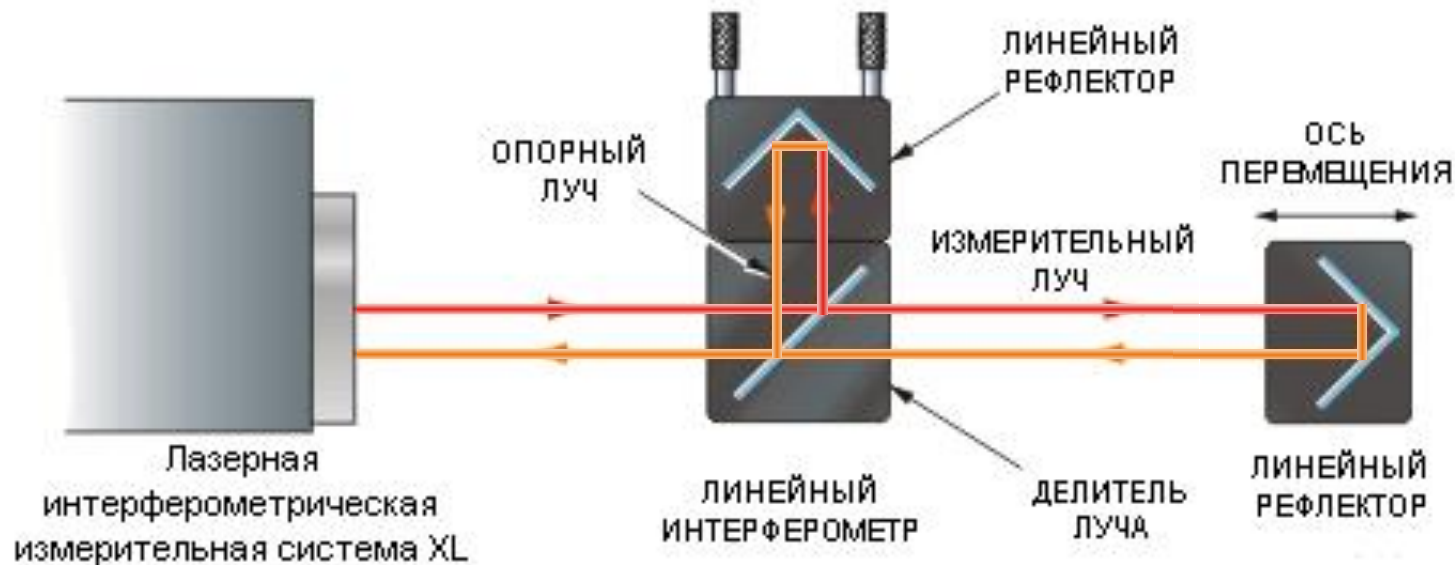


# Интерферометр Майкельсона

- Сигнал  $U_{\text{вых}}$  представляет собой постоянное напряжение, уровень которого пропорционален интенсивности интерференционной картины и изменяется вместе с контролируемым перемещением. В качестве источника излучения используются лазеры (газовые или полупроводниковые), а в качестве приёмников – фотоэлектрические измерительные преобразователи.

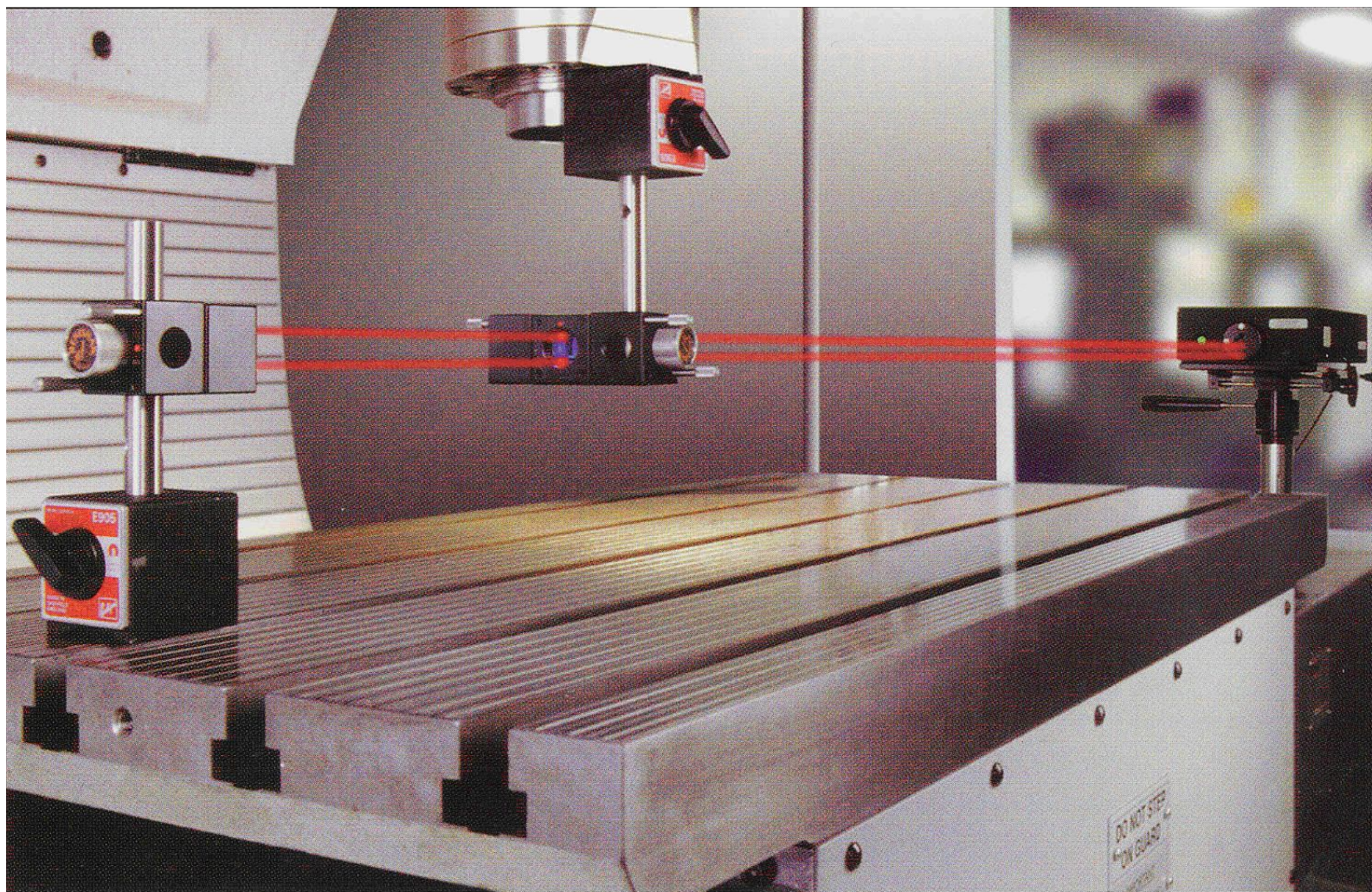
# Схема интерферометра Майкельсона

ВИД СБОКУ





# Общий вид ИС на основе интерферометра Майкельсона



# Типы интерференционных ИС

- Все предлагаемые на мировом рынке ИС построены по схеме интерферометра Майкельсона, но принципиально отличаются по способам преобразования измерительной информации.
- По этому признаку ИС делятся на 2 типа:
  - гомодинные ИС
  - гетеродинные ИС

# Гомодинные ИС

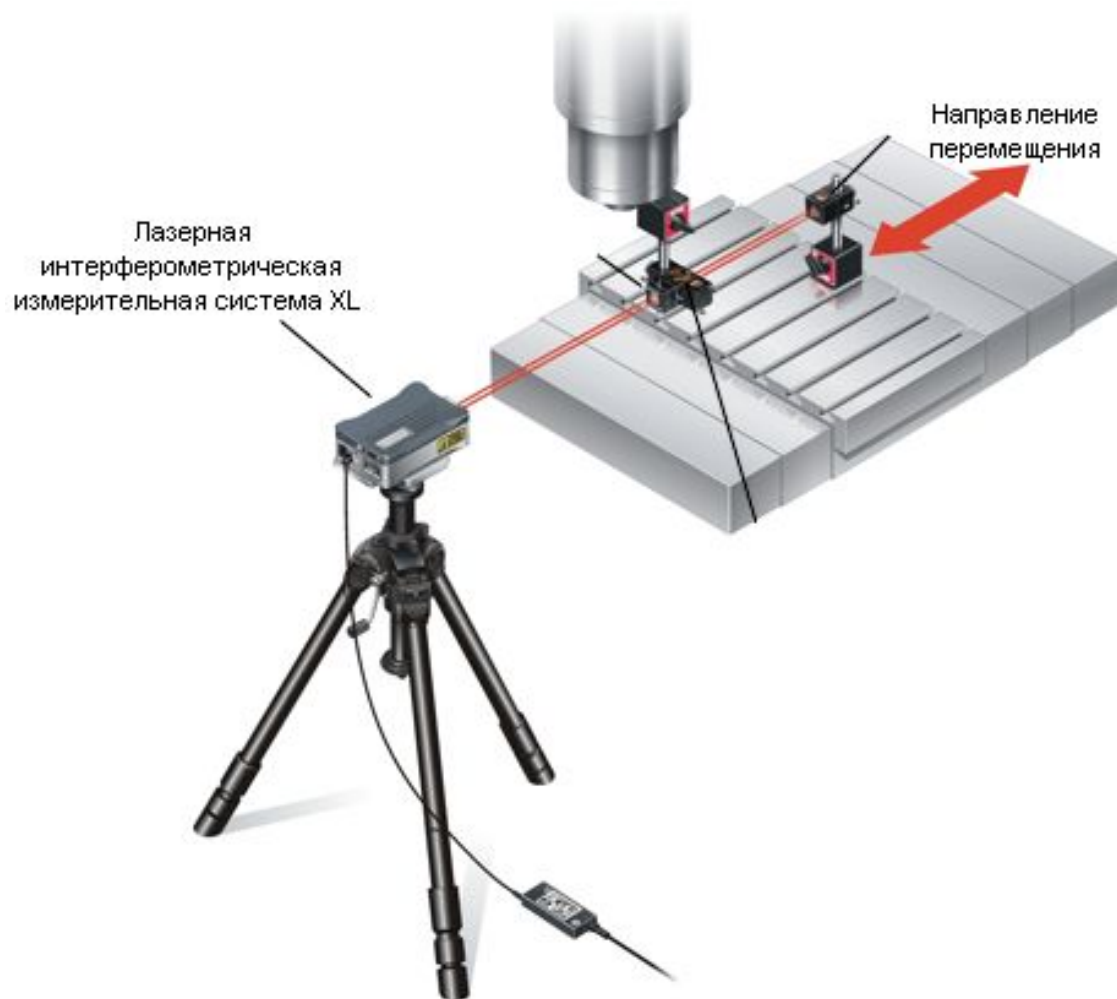
- Гомодинные ИС предполагают, что оптические частоты световых пучков в измерительном и опорном каналах одинаковы ( $\nu_0 = \nu_1 = \nu_2$ ). В этом случае, как показано на слайдах 8, 11 и 13, имеет место **амплитудное** преобразование измерительной информации, т.е. изменение уровня сигнала постоянного тока в зависимости о перемещения.
- Недостатками такой системы является низкая помехоустойчивость, необходимость использования усилителя постоянного тока.



# Гомодинные ИС

- К серийно выпускаемым ИИС относятся ИС XL-80 фирмы Renishaw (Великобритания), MI 5000 фирмы SIOS (Германия) и др.
- Параметры гомодинных ИС представлены в таблице на слайде 18.

# Общий вид ИИС XL-80 фирмы Renishaw



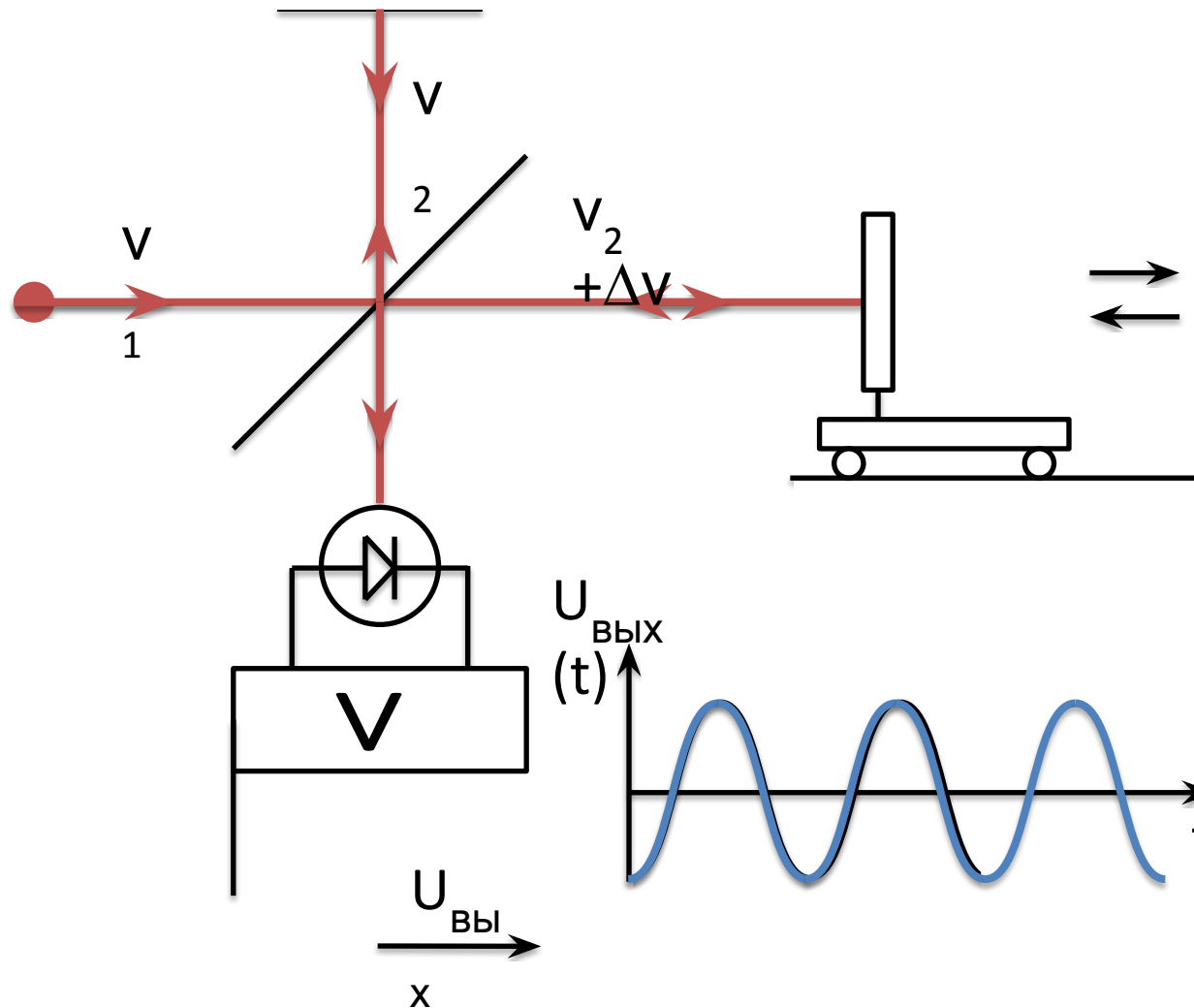
# Параметры гомодинных ИС

Название ЛИИС, фирма-производитель	XL-80 (Renishaw)	RLD10 (Renishaw)	MI 5000 (SIOS)	Distax 300A (Accretech)
применение	Калибровка СП ТО и КСИ	В составе СП ТО и КСИ	Калибровка и в составе СП ТО и КСИ	калибровка СП ТО и КСИ
разрешающая способность, нм	1	10	1; 0,1	2,5
Погрешность линейных измерений, мкм/м	0,7	*	*	*
Максимальная скорость подвижного отражателя, м/с	1	2	0,6	0,6
Диапазон линейных перемещений, м	80	4	5	10
Связь между лазером и интерферометром	прямая видимость	оптическое волокно	оптическое волокно	оптическое волокно
Размещение интерферометра и узла детектирования	раздельное	совместное	совместное	совместное

# Гетеродинные ИС

- Другим типом ИС для измерения перемещений является **гетеродинный** интерферометр.
- Особенность этого типа заключается в том, что в измерительном и опорном каналах интерферометра Майкельсона распространяются оптические волны **различной** оптической частоты, т.е.  $\nu_1 \neq \nu_2$
- Двухлучевая гетеродинная схема интерферометра Майкельсона представлена на слайде 21.

# Гетеродинные ИС



# Гетеродинные ИС

- В результате интерференции разночастотных световых пучков на фотоприёмнике формируется переменная составляющая в виде гармонического сигнала, частота которого равна разностной частоте  $f = \nu_1 - \nu_2$ , а **фаза** пропорциональна контролируемому перемещению.
- Таким образом имеет место фазовое измерительное преобразование перемещения подвижного отражателя.

# Гетеродинные ИС

Преимуществом гетеродинного метода является:

- более высокая помехоустойчивость, так как имеет место избирательное усиление на высокой несущей частоте и более высокая разрешающая способность, так как измерение фазы несущей частоты сводится к электрической фазометрии. При перемещении, равном  $\lambda/2$ , фаза смещается на 360 градусов. Имея фазометрическую схему с разрешением в 1 электрический градус, получаем разрешение по перемещению, равное  $\lambda/720$ , то есть менее 1 нм. Возможна и более высокая разрешающая способность ( $\lambda/1200$  и т.д.)

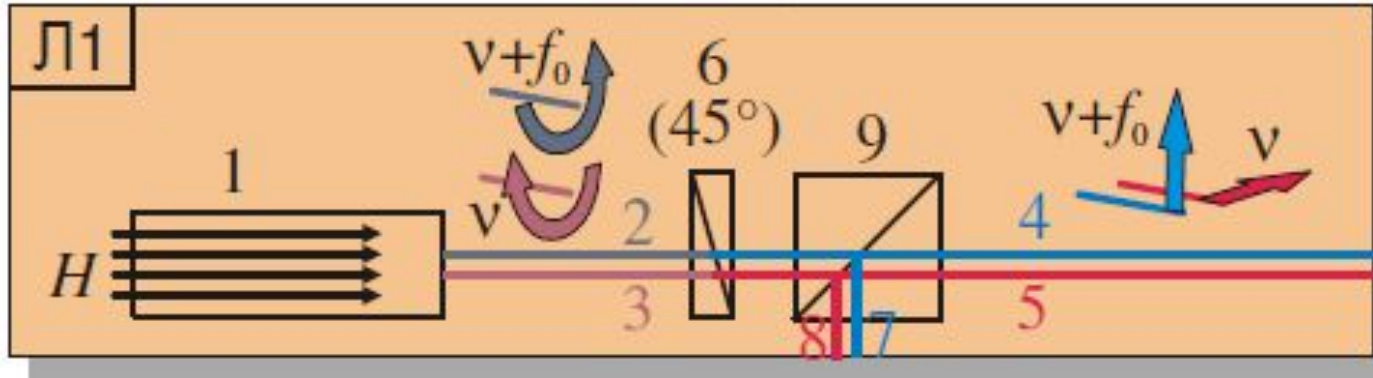
# Гетеродинные ИС

Основной проблемой построения гетеродинных интерферометров является способ осуществления когерентного преобразования частоты света. В настоящее время в ИС, представленных на мировом рынке, используются 2 способа преобразования частоты света:

- на основе зеемановского расщепления спектральной линии в магнитном поле (фирма Agilent, США);
- на основе акустооптического взаимодействия (фирма Zygo, США).



# ИС на основе эффекта Зеемана



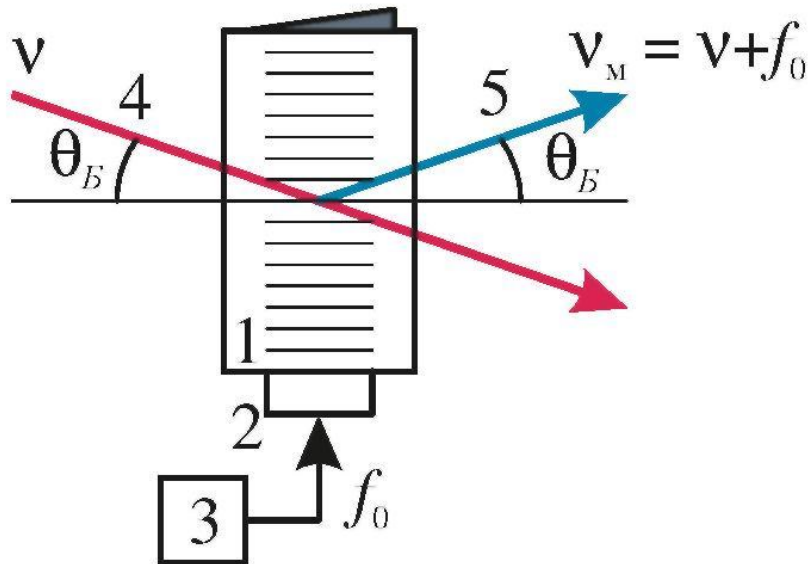
В узле излучателя Л1 системы на основе эффекта Зеемана под действием внешнего аксиального магнитного поля спектральная линия генерации активной среды лазера 1 расщепляется на две. На выходе лазера 1 имеем две круговые поляризации 2 и 3 с различными оптическими частотами. Для получения линейных поляризаций 4 и 5 на выходе лазера устанавливают четвертьволновую пластину 6. Для получения опорного электрического канала часть излучения 7 и 8 (около 5%) выводят из узла излучателя с помощью неполяризованного светоделителя 9. Формирование электрического сигнала опорного канала происходит в узле детектирования.

# ИС на основе эффекта Зеемана

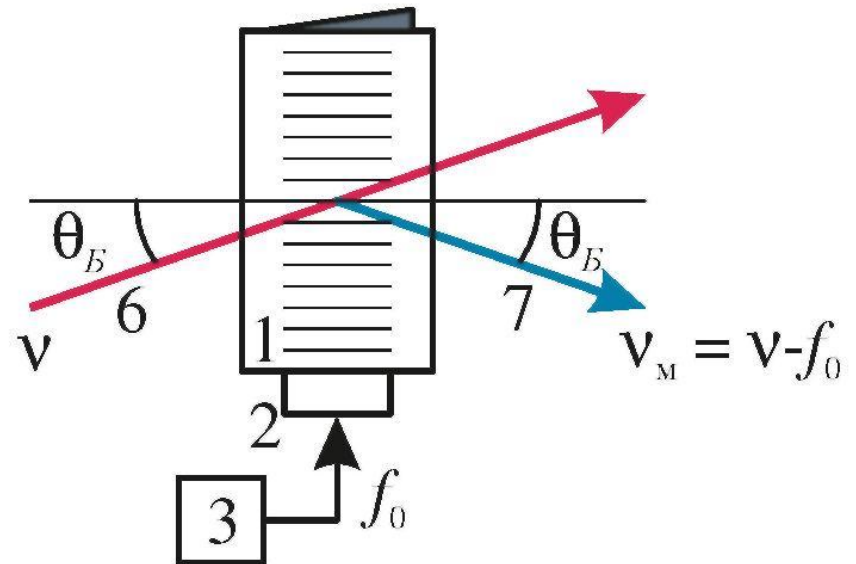
- Недостатком магнитооптического преобразования частоты света является зависимость частот интерферирующих волн от окружающего магнитного поля и относительно узкий диапазон сдвига частот (порядка 1,8 МГц), что ограничивает скорость контролируемых перемещений до 1 м/с.
- Более перспективным является преобразование частоты света на основе акустооптического взаимодействия.

# Принцип акустооптического взаимодействия (АОВ)

(а)



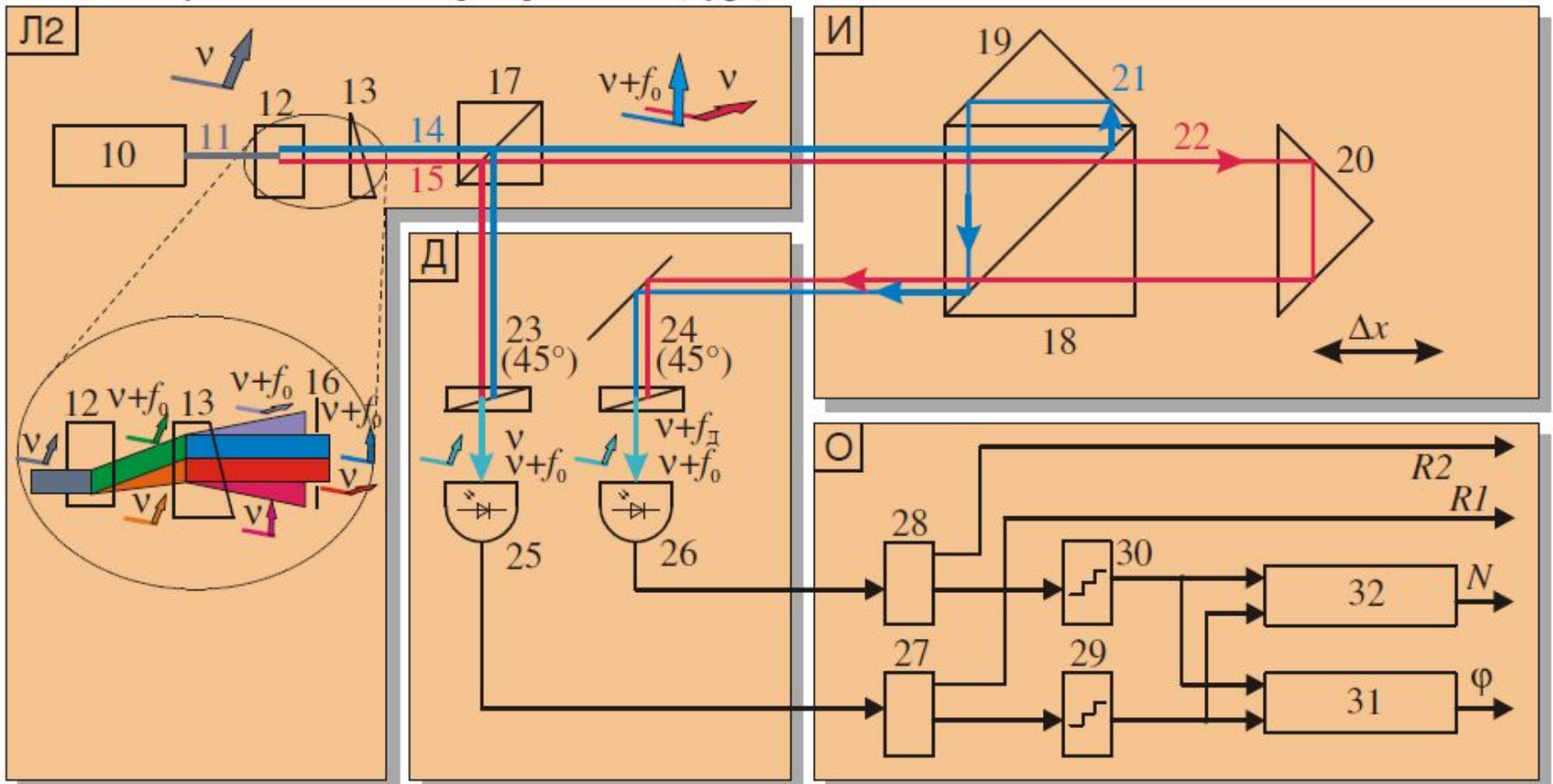
(б)



# Принцип акустооптического взаимодействия (АОВ)

- В модуляторе 1 с помощью пьезопреобразователя 2 и радиочастотного генератора 3 возбуждается бегущая акустическая волна с частотой  $f_0$ , действующая на проходящее излучение как фазовая решетка. При определенном угле падения  $\Theta_B$  оптического излучения 4 к фронту акустической волны, определяемом условием Брэгга  $\Theta_B = \lambda/(2\Lambda)$ , где  $\lambda$  - длина волны оптического излучения,  $\Lambda$  - длина акустической волны, на выходе формируется дифракционный максимум 5, частота которого  $\nu$  определяется частотой акустической волны (в указанном на рис. а случае  $\nu_M = \nu + f_0$ ). Для изотропной дифракции углы падения и отклонения оптического излучения равны. Изменение угла падения излучения 6 на противоположный по знаку также приводит к образованию дифракционного максимума 7, но с отклонением по частоте другого знака (в указанном на рис. б случае  $\nu_M = \nu - f_0$ ).

# ИС на основе АОВ



# ИС на основе АОВ

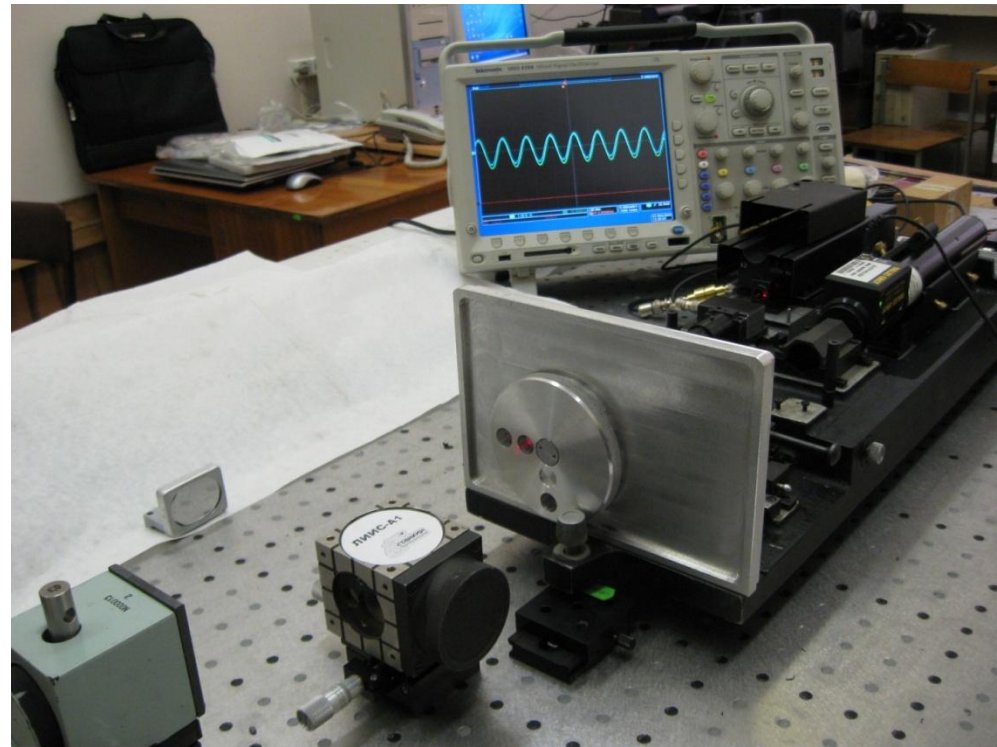
- Излучение 11 одночастотного лазера 10 с линейной поляризацией под углом  $45^\circ$  и частотой  $\nu$  поступает на акустооптический модулятор 12, на выходе которого формируется нулевой и первый порядок дифракции с частотами  $\nu$  и  $\nu + f_0$  соответственно, где  $f_0$  – частота возбуждения ультразвука в модуляторе. Далее установлен оптический двулучепреломляющий клин 13, на выходе которого совмещаются два пучка 14 и 15 с ортогональными направлениями линейной поляризации и различными оптическими частотами. Неиспользуемые пучки отсекаются диафрагмой 16. Назначение неполяризованного светоделителя такое же, как и в зеемановском лазерном узле.

# Параметры гетеродинных ИС

Название ЛИИС, фирма-производитель	5530, Agilent (США)	серия 2000, Zygo(США)
применение	калибровка СП ТО и КСИ	калибровка и в составе СП ТО и КСИ
преобразователь частоты	на эффекте Зеемана	АОМ
разрешение, нм	0,5	0,1
погрешность линейных измерений, мкм/м	1	*
максимальная скорость подвижного отражателя, м/с	1	4
диапазон перемещений, м	80	80
связь между лазером и интерферометром	прямая видимость	прямая видимость
размещение интерферометра и узла детектирования	раздельное	раздельное

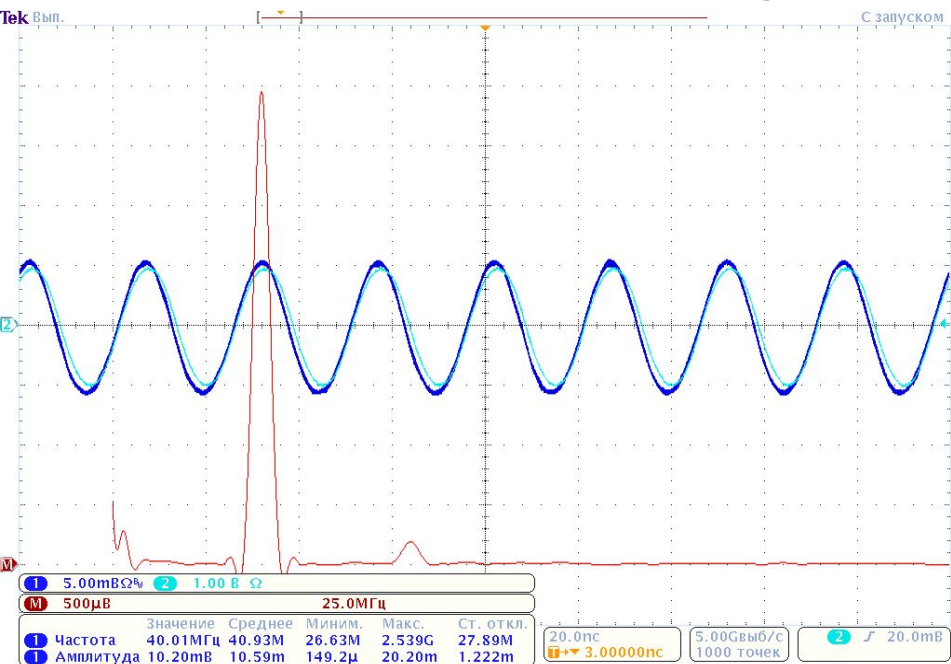
# Внешний вид ИС с акустооптическим преобразованием частоты (Россия, МГТУ «Станкин»)

Диапазон измерения - до 40  
М;  
Дискретность отсчёта – 0,5  
нм;  
Несущая частота - 40 МГц;  
Точность - 0,5 мкм/м

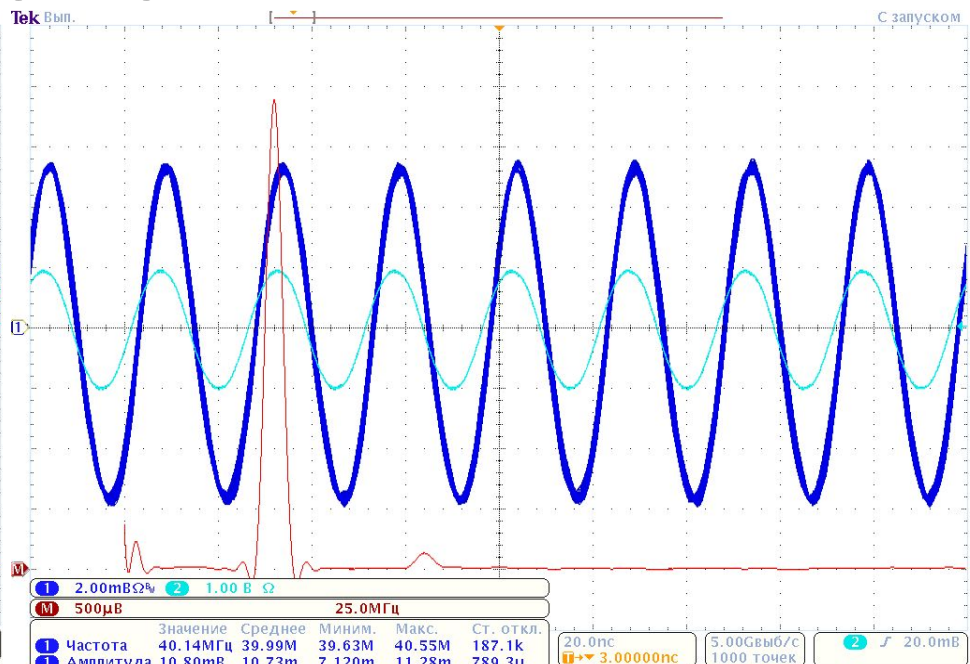




# Осциллограммы измерительных сигналов



а

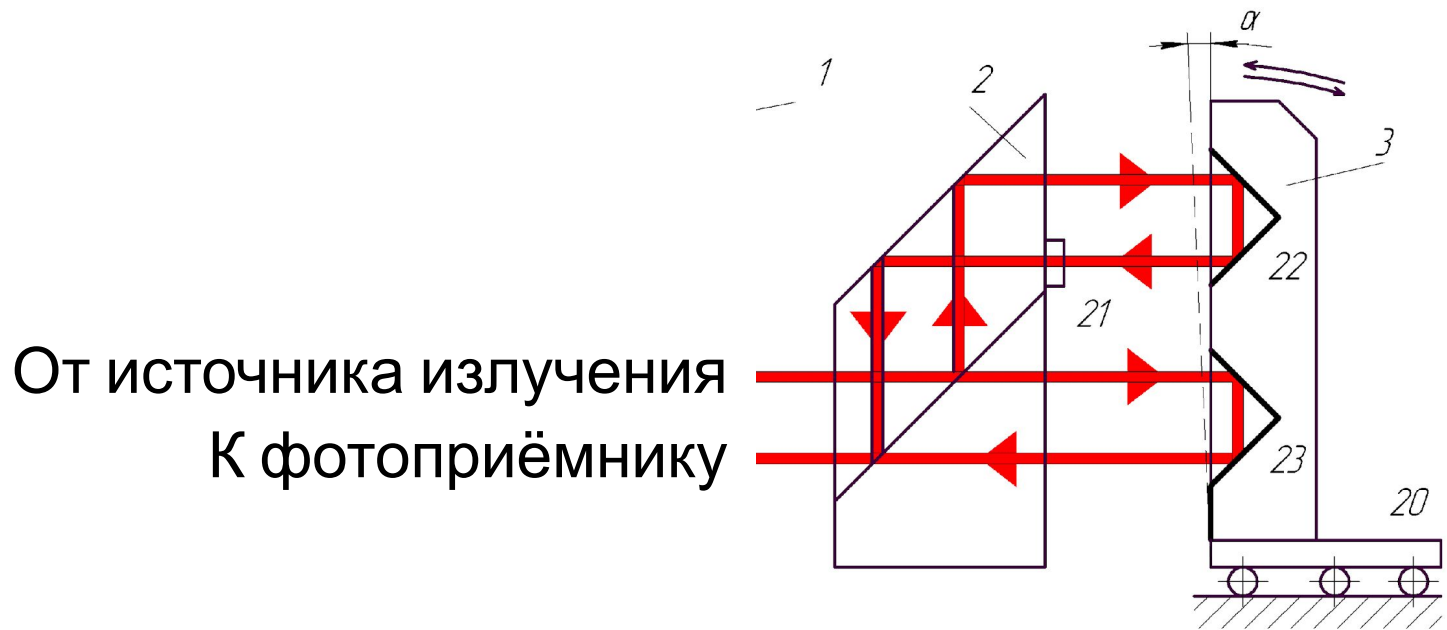


б

а) совпадение сигналов

б) перемещение на 20 нм

# Измерение угловых отклонений

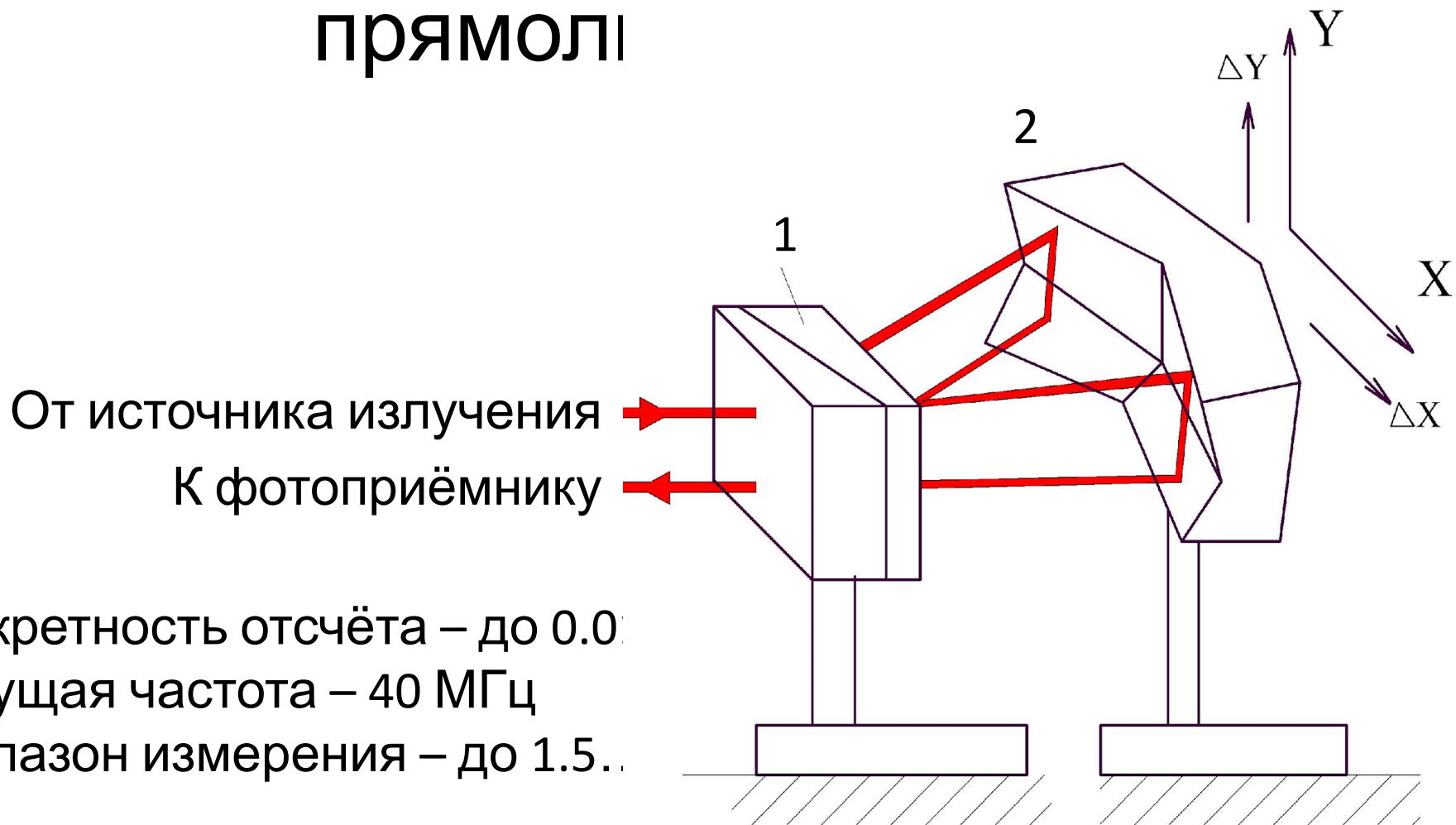


Дискретность отсчёта – до 0.5 угл. сек

Несущая частота – 40 МГц

Диапазон измерения – до 2...5 угл. мин

# Измерение отклонений от прямолі

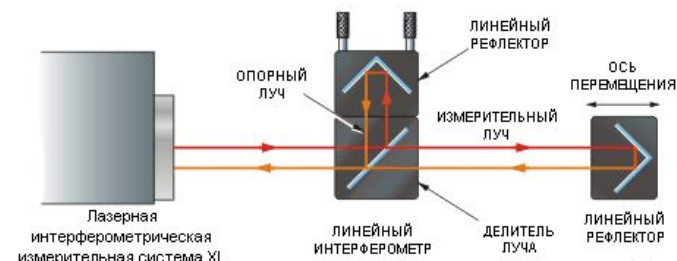


- 1 – поляризационный элемент (призма Волластона)
- 2 – зеркальный уголкового отражатель

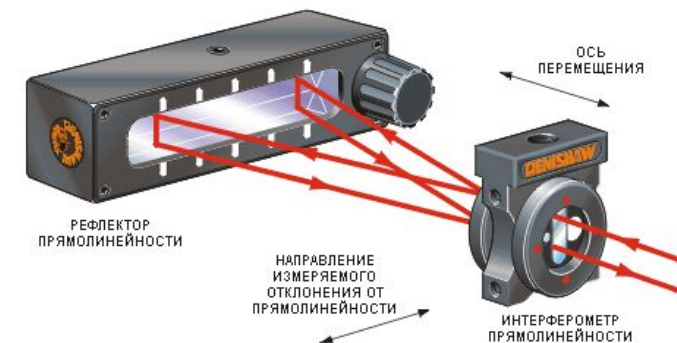
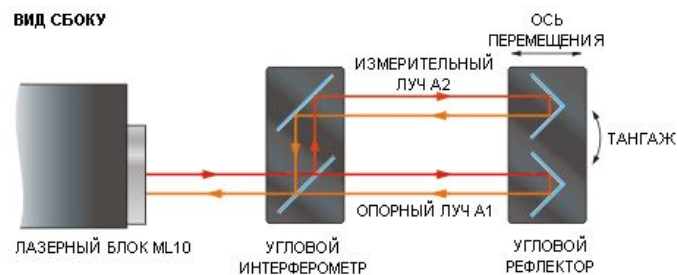
# Измерение геометрических параметров станков и КИМ посредством ИС XL-80 фирмы Renishaw



ВИД СБОКУ

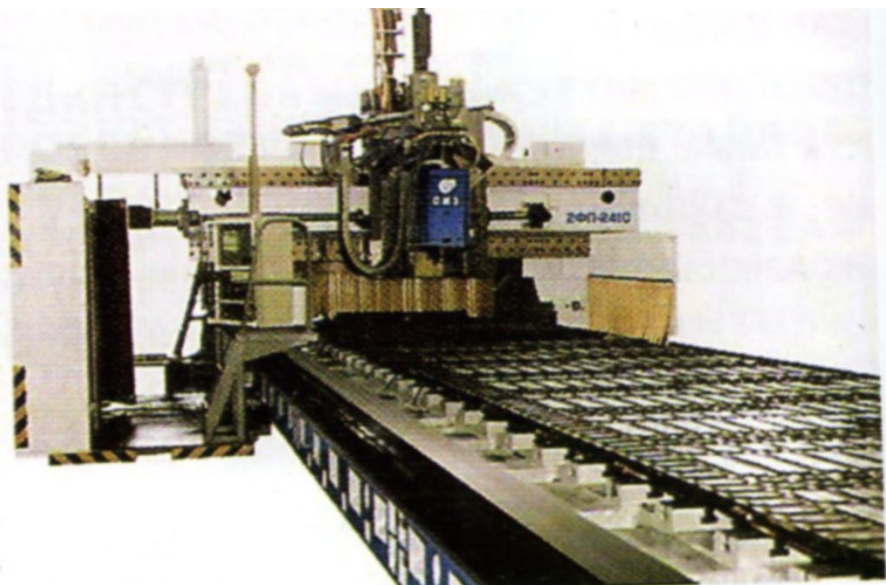


ВИД СБОКУ

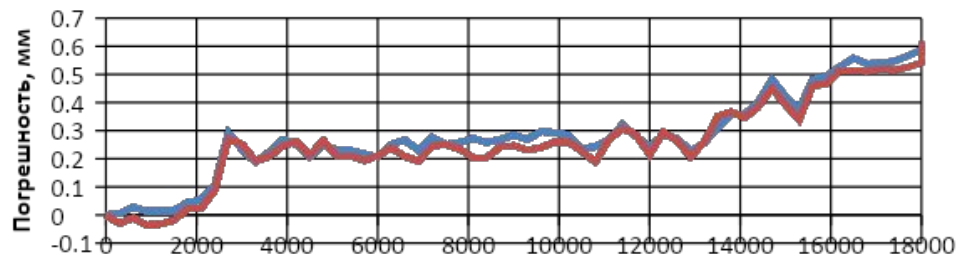


# Лазерная коррекция погрешностей позиционирования

Точность позиционирования обрабатывающего центра 2ФП-241С с подвижным порталом. Размер стола 2060x35240 мм



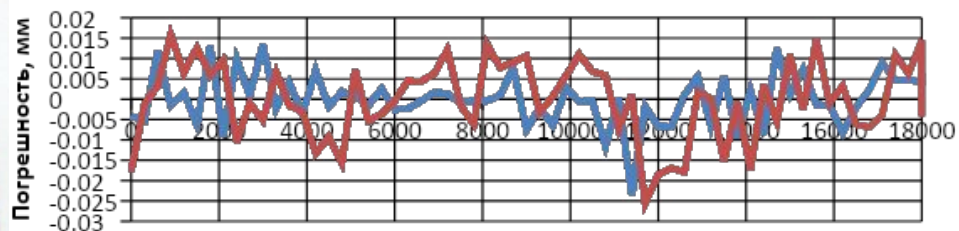
Погрешность позиционирования портала по оси X до коррекции, мм



Координаты контрольных точек, мм

— Прямой ход — Обратный ход

Погрешность **позиционирования** портала по оси X после коррекции, мм



— Координаты контрольных точек, мм

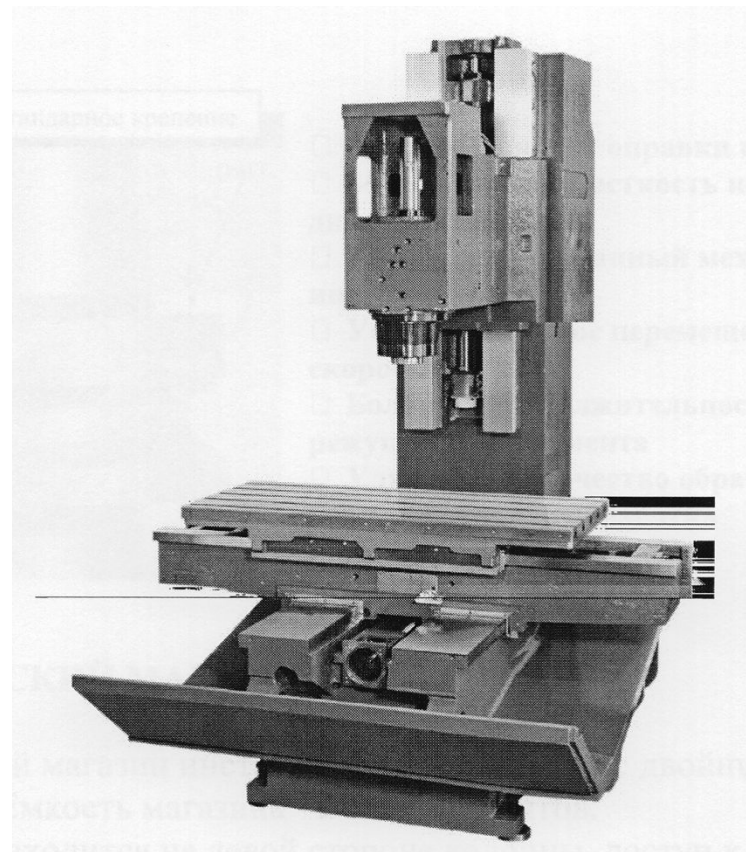
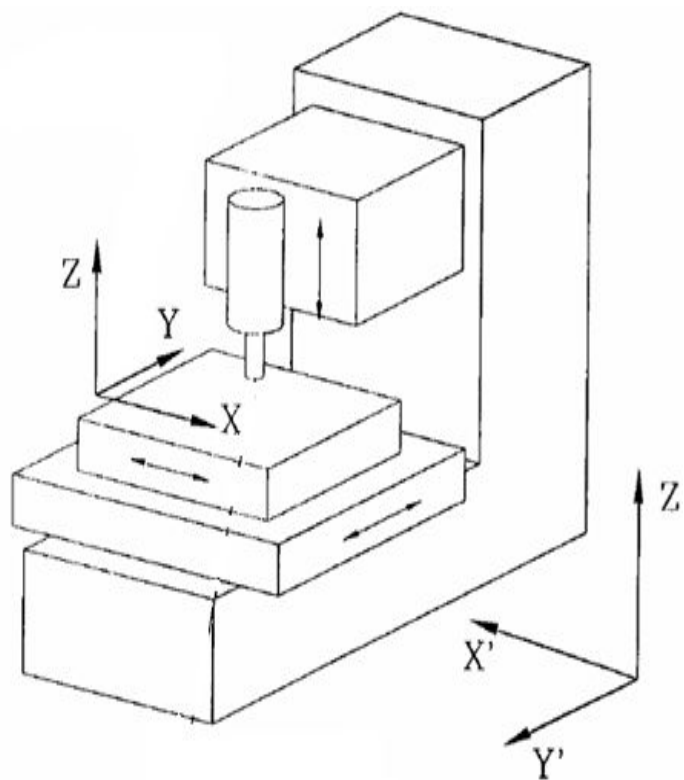


# Управление геометрической точностью трёхкоординатного станка с ЧПУ



Вертикально-фрезерный  
обрабатывающий центр с ЧПУ Kondia

# Объект наблюдения – фрезерный обрабатывающий центр Kondia A-10







# Параметрические функции объёмной точности

№ п/п	Наименование	Обозначение	Средство измерения
1	перемещение по оси Oх	$\delta_{xx}(X)$	линейный интерферометр
2	прямолинейность оси Oх в направлении оси Oу	$\delta_{yx}(X)$	интерферометр для измерения прямолинейности
3	прямолинейность оси Oх в направлении оси Oz	$\delta_{zx}(X)$	интерферометр для измерения прямолинейности
4	крен оси Oх	$\varepsilon_{xx}(X)$	электронные уровни (нивелиры)
5	тангаж оси Oх	$\varepsilon_{yx}(X)$	угловой интерферометр
6	рыскание оси Oх	$\varepsilon_{zx}(X)$	угловой интерферометр
7	перемещение по оси Oу	$\delta_{yy}(Y)$	линейный интерферометр
8	прямолинейность оси Oу в направлении оси Oх	$\delta_{xy}(Y)$	интерферометр для измерения прямолинейности
9	прямолинейность оси Oу в направлении оси Oz	$\delta_{zy}(Y)$	интерферометр для измерения прямолинейности
10	крен оси Oу	$\varepsilon_{yy}(Y)$	электронные уровни (нивелиры)
11	тангаж оси Oу	$\varepsilon_{xy}(Y)$	угловой интерферометр
12	рыскание оси Oу	$\varepsilon_{zy}(Y)$	угловой интерферометр
13	Перемещение по оси Oz	$\delta_{zz}(Z)$	линейный интерферометр
14	прямолинейность оси Oz в направлении оси Oх	$\delta_{xz}(Z)$	интерферометр для измерения прямолинейности
15	прямолинейность оси Oz в направлении оси Oу	$\delta_{yz}(Z)$	интерферометр для измерения прямолинейности
16	крен оси Oz	$\varepsilon_{zz}(Z)$	электронные уровни (нивелиры)
17	тангаж оси Oz	$\varepsilon_{xz}(Z)$	угловой интерферометр
18	рыскание оси Oz	$\varepsilon_{yz}(Z)$	угловой интерферометр

# Вычисление компонентов полной объёмной погрешности

$$\mathbf{XYZ} = R_X \left[ {}_Y(R_Z^{-1}\mathbf{T} + \mathbf{Z} - \mathbf{Y}) - \mathbf{X} \right],$$

$$\begin{aligned} \Delta X = & \delta_{XX}(X) + \delta_{XZ}(Z) + \delta_{XY}(Y) + Y[\varepsilon_{ZY}(Y) + \varepsilon_{ZX}(X)] + Y\alpha_{YX} - Z[\varepsilon_{YY}(Y) + \varepsilon_{YX}(X)] - \\ & - Z\alpha_{ZX} + X_T - Y_T[\varepsilon_{ZX}(X) + \varepsilon_{ZY}(Y)] - Z_T[\varepsilon_{YZ}(Z) + \varepsilon_{YY}(Y) + \varepsilon_{YX}(X)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Y = & \delta_{YY}(Y) + \delta_{YX}(X) + \delta_{YZ}(Z) - X\varepsilon_{ZX}(X) - Z[\varepsilon_{XY}(Y) + \varepsilon_{XX}(X)] - Z\alpha_{ZY} + \\ & + X_T[\varepsilon_{ZY}(Y) + \varepsilon_{ZX}(X)] + Y_T - Z_T[\varepsilon_{XY}(Y) + \varepsilon_{XX}(X) + \varepsilon_{XZ}(Z)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Z = & \delta_{ZZ}(Z) + \delta_{ZX}(X) + \delta_{ZY}(Y) - X\varepsilon_{YX}(X) - Y[\varepsilon_{XY}(Y) + \varepsilon_{XX}(X)] + \\ & + X_T[\varepsilon_{YX}(X) + \varepsilon_{YZ}(Z) + \varepsilon_{YY}(Y)] + Y_T[\varepsilon_{XY}(Y) + \varepsilon_{XZ}(Z) + \varepsilon_{XX}(X)] + Z_T, \end{aligned}$$

$$\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$$

# Точность позиционирования вдоль оси X

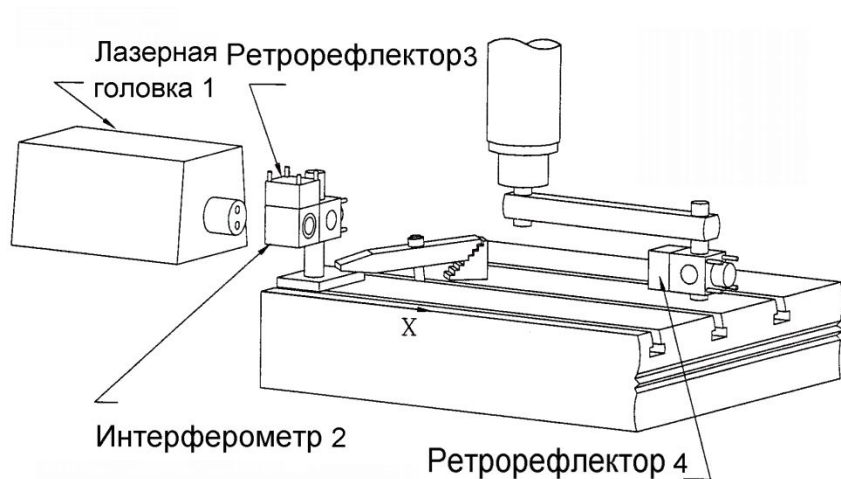


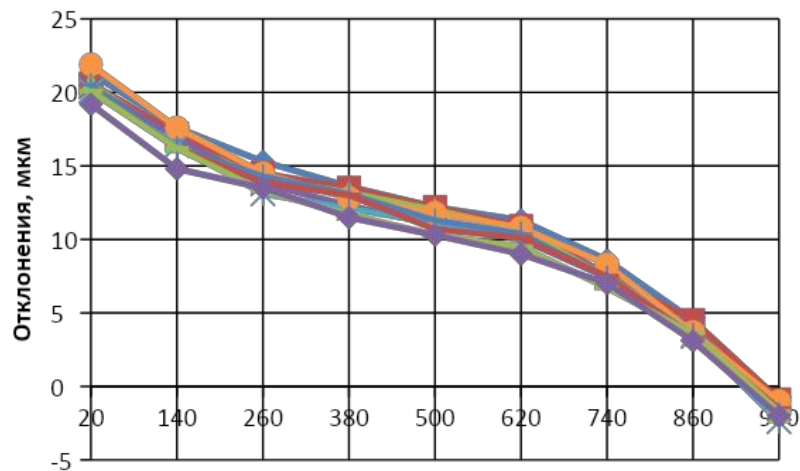
Схема наладки



Вид на станке

# Точность позиционирования вдоль оси X станка Kondia A-10

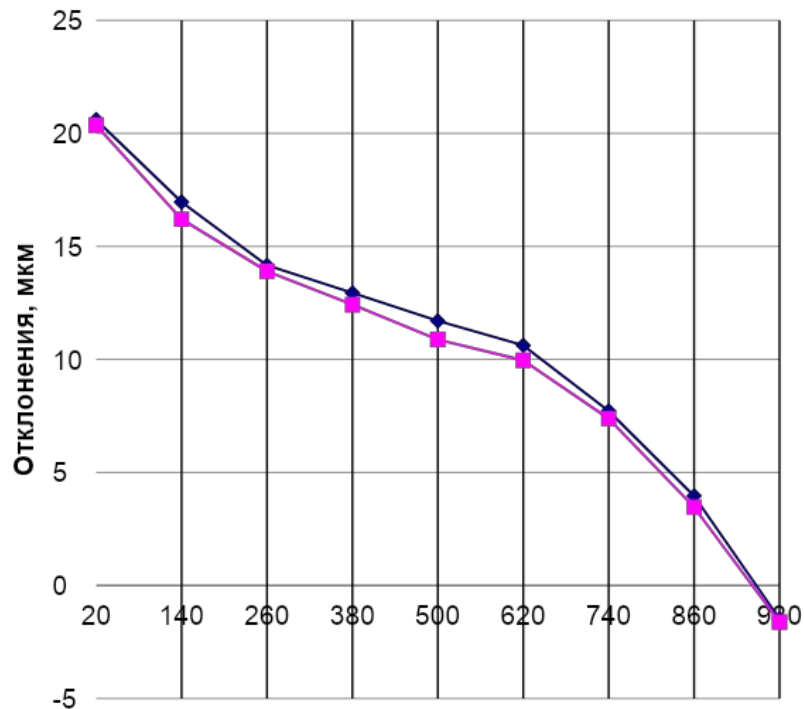
Отклонения позиционирования оси X



Координата, мм

- ◆ Прямой ход - 1
- Прямой ход - 2
- ▲ Прямой ход - 3
- ✕ Прямой ход - 4
- ✱ Прямой ход - 5
- Обратный ход - 1
- ⊕ Обратный ход - 2
- ▬ Обратный ход - 3
- ▬ Обратный ход - 4
- ◆ Обратный ход - 5

Отклонения позиционирования оси  
Хобработанные данные



Координата, мм

- ◆ Прямой ход
- Обратный ход

# Непрямолинейность оси X в направлении оси Y

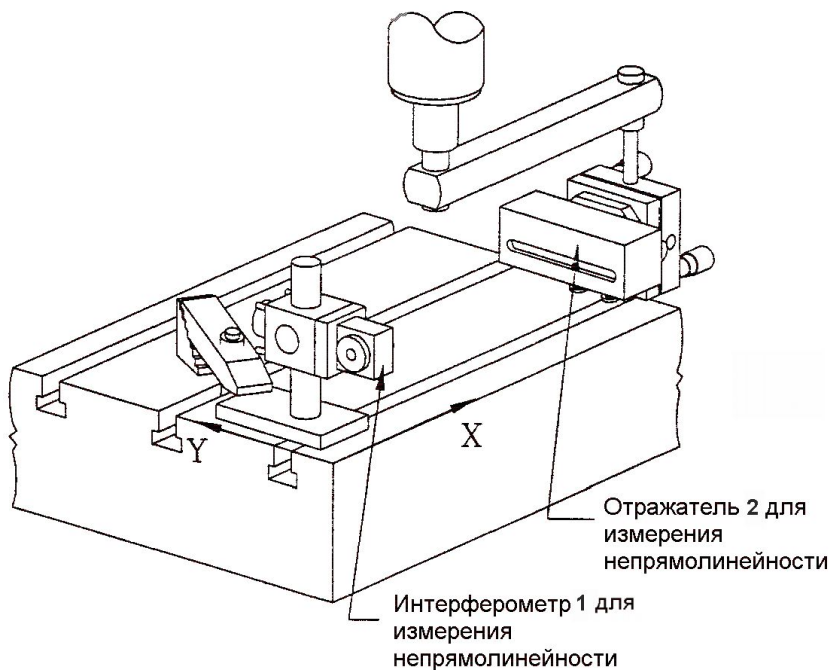
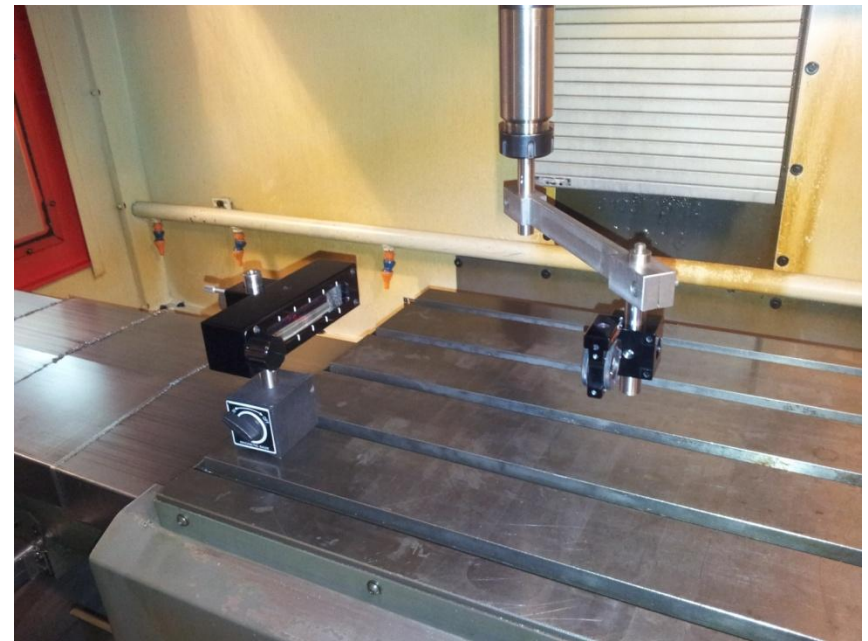
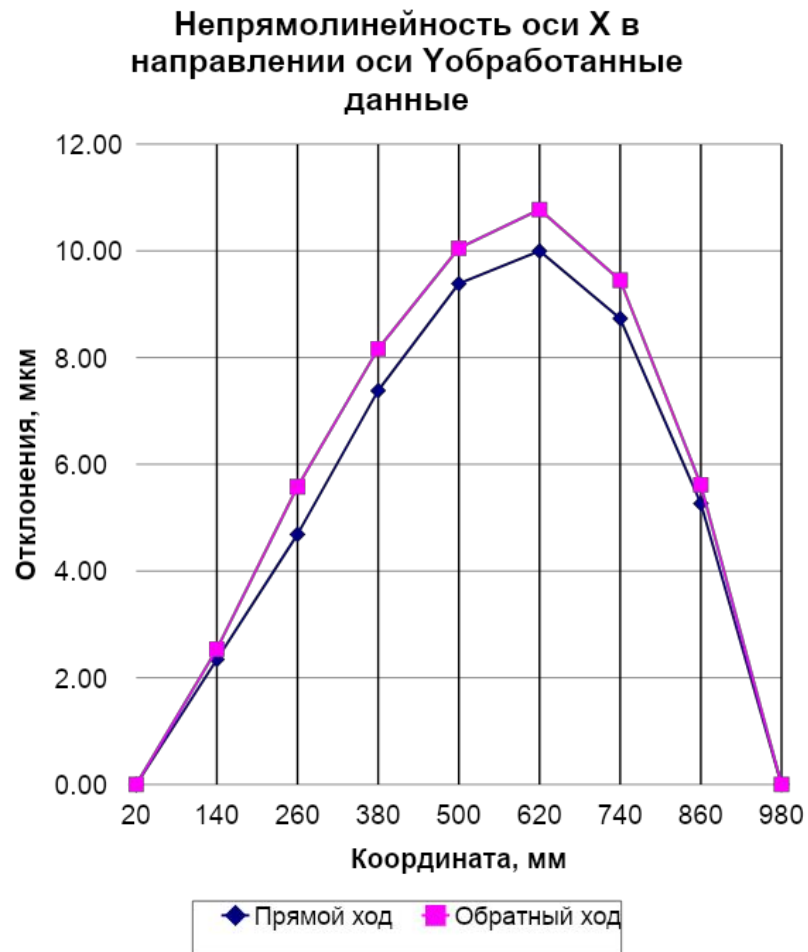
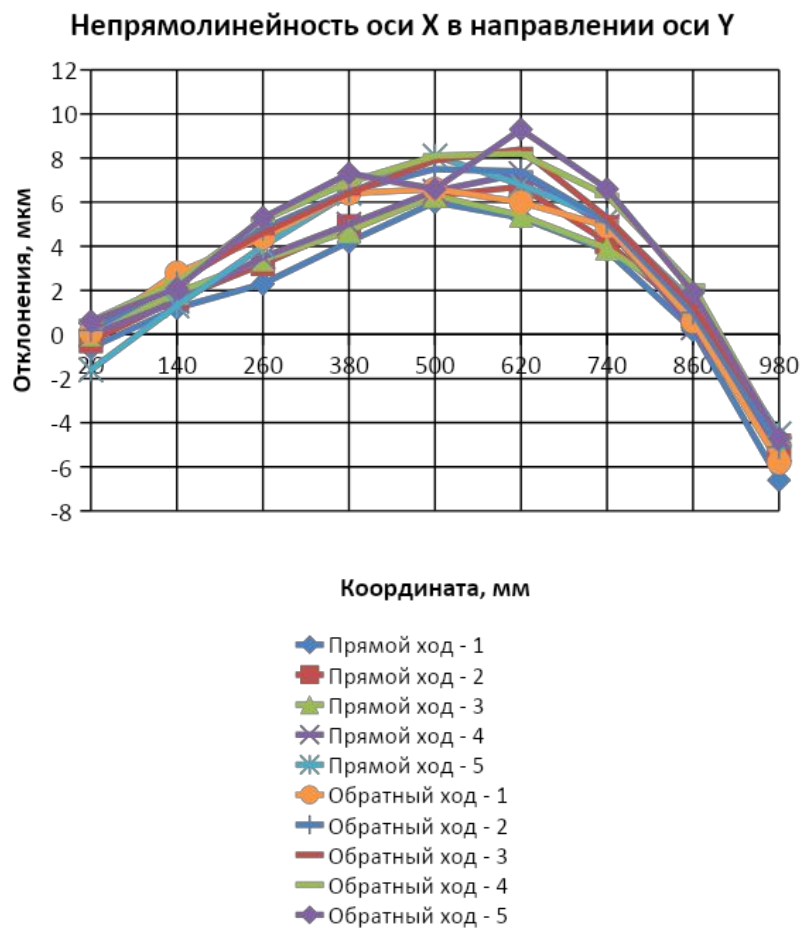


Схема наладки



Вид на станке

# Непрямолинейность оси X в направлении оси Y станка Kondia A-10



# Угловые отклонения оси Y вокруг оси Z

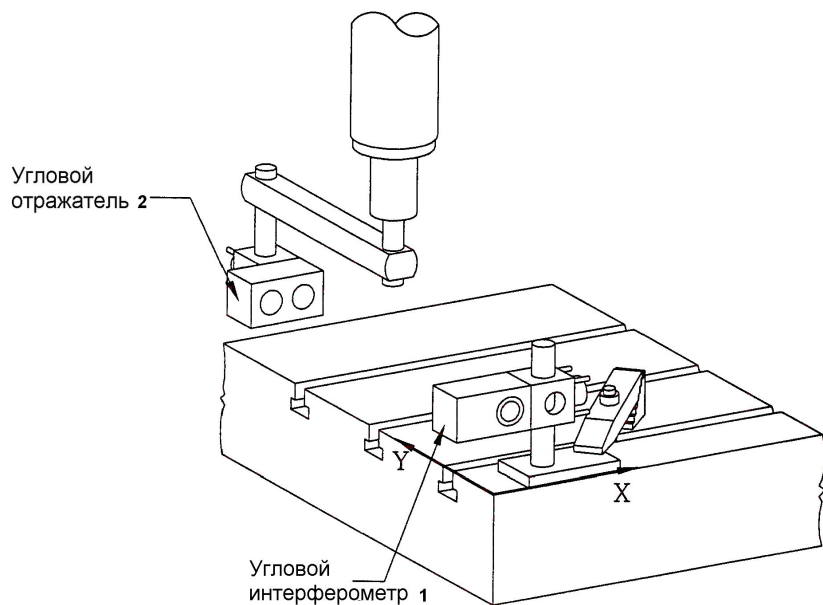
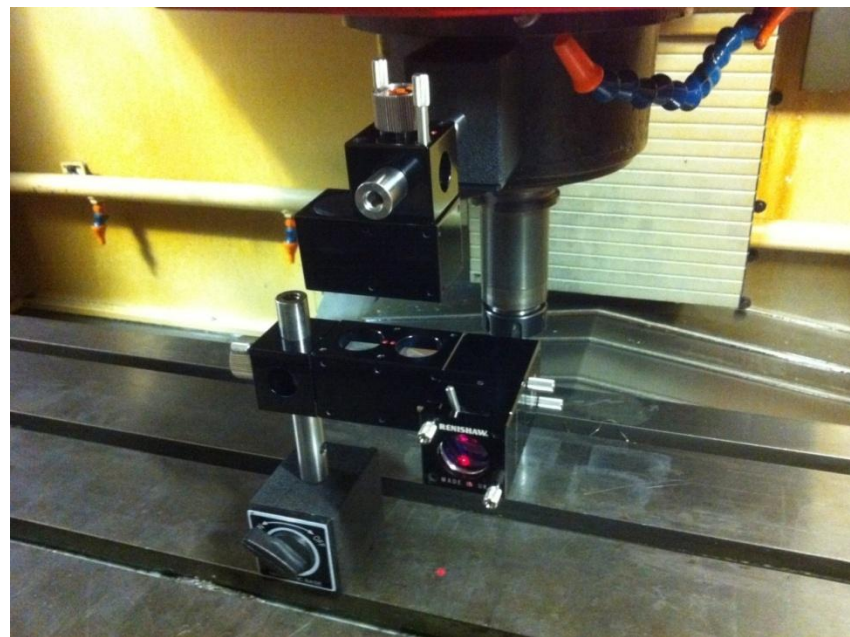


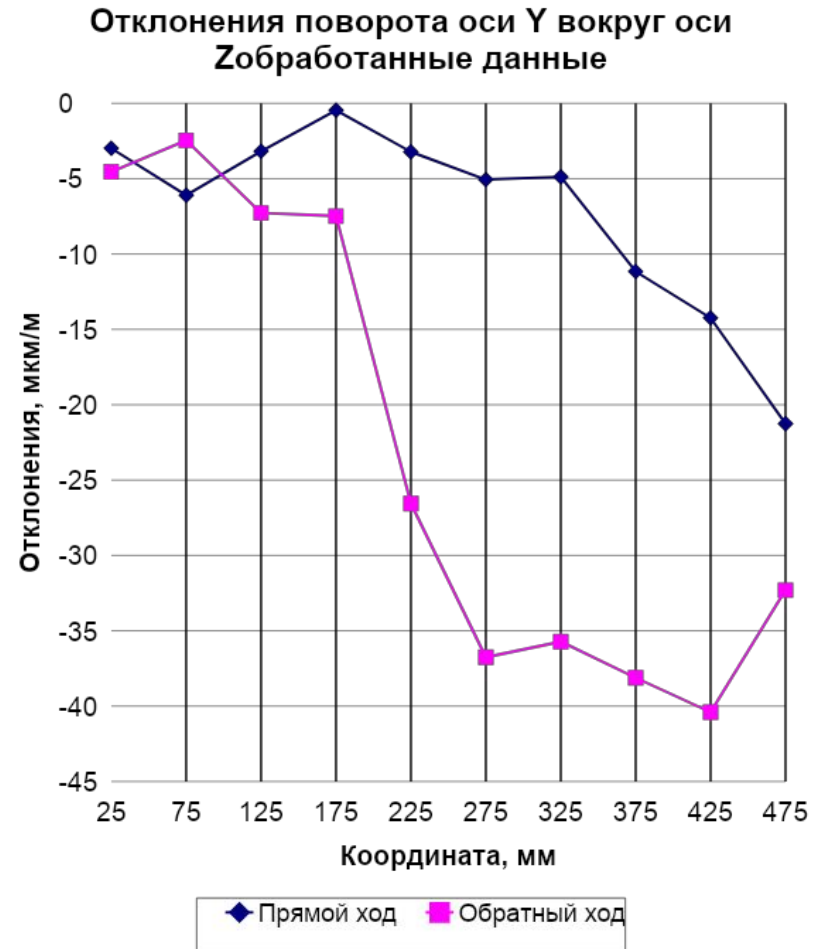
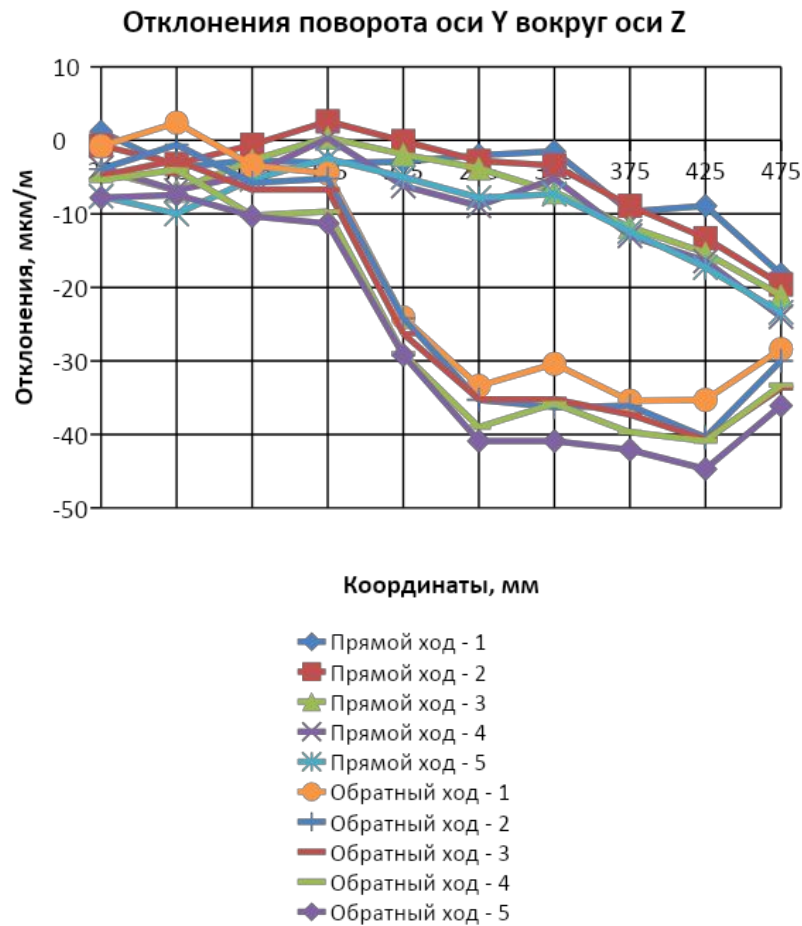
Схема наладки



Вид на станке



# Угловые отклонения оси Y вокруг оси Z станка Kondia A-10





# Геометрическая точность оси X станка Kondia A-10 по ГОСТ 27843-2006 (ISO 230-2:1997)

Номер заданной позиции $i$	1		2		3		4		5		6		7		8		9		
Целевая позиция $P_i$ , мм	20		140		260		380		500		620		740		860		980		
Направление подхода	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓	
Позиционные отклонения, мкм	J=1	21,3	21,9	17,6	17,6	15,3	14,5	13,6	12,8	12,2	11,8	11,3	10,8	8,6	8,3	4,5	3,7	-0,9	-1,0
	2	20,6	20,5	17,2	16,2	14,5	14,3	13,5	13,1	12,2	11,3	10,9	10,4	7,6	7,4	4,5	3,5	-0,9	-1,9
	3	20,6	20,1	16,7	16,2	14,1	13,9	13,2	13,0	12,0	10,7	10,7	10,1	7,4	7,5	3,5	3,4	-1,7	-1,5
	4	20,4	20,1	16,9	16,2	13,8	13,3	12,3	11,7	11,0	10,3	10,0	9,5	7,4	6,7	3,9	3,6	-1,5	-1,7
	5	20,1	19,2	16,4	14,8	13,1	13,5	12,1	11,5	11,1	10,3	10,2	9,0	7,6	7,0	3,4	3,1	-2,4	-2,0
Среднее одностороннее позиционное отклонение, $\bar{x}_i$ , МКМ	20,6	20,4	17,0	16,2	14,2	13,9	12,9	12,4	11,7	10,9	10,6	10,0	7,7	7,4	4,0	3,5	-1,5	-1,6	
Среднеквадратическая неопределенность $s_i$ , мкм	0,4	1,0	0,5	1,0	0,8	0,5	0,7	0,8	0,6	0,7	0,5	0,7	0,5	0,6	0,5	0,2	0,6	0,4	
$2s_i$ , мкм	0,9	2,0	0,9	2,0	1,6	1,0	1,4	1,5	1,2	1,3	1,1	1,4	1,0	1,2	1,1	0,5	1,3	0,8	
$\bar{X}_i - 2s_i$ , мкм	19,7	18,4	16,0	14,2	12,5	12,9	11,6	10,9	10,5	9,6	9,6	8,5	6,7	6,2	2,9	3,0	-2,7	-2,4	
$\bar{X}_i + 2s_i$ , мкм	40,3	38,8	33,0	30,4	26,7	26,8	24,5	23,3	22,2	20,4	20,2	18,5	14,4	13,5	6,9	6,5	-4,2	-4,0	
Повторяемость в одном направлении $R_i = 4s_i$ , мкм	3,5	7,9	3,7	7,9	6,5	4,1	5,6	6,1	4,8	5,3	4,2	5,7	4,0	4,8	4,2	1,8	5,0	3,2	
Зона нечувствительности $B_i$ , мкм	0,2	0,8	0,3	0,5	0,8	0,7	0,3	0,5	0,1	0,1	0,3	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
Повторяемость в двух направлениях позиционирования $R_i$ , мкм	7,9	7,9	6,5	6,1	5,3	5,7	4,8	4,2	5,0	5,0	4,2	5,0	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{X}_i$ , мкм	20,5	16,6	14,0	12,7	11,3	10,3	7,6	3,7	-1,6										
Отклонение оси, мм	Одностороннее ↑										Одностороннее ↓				Двустороннее				
Зона нечувствительности $B$	Не применимо										Не применимо				0,0008 мм ( $n_i=5$ )				
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$	Не применимо										Не применимо				0,0005 мм				
Среднее двустороннее позиционное отклонение $M$	Не применимо										Не применимо				0,00187 [0,0205-(-0,0016)] мм				
Систематическое позиционное отклонение $E$	0,0221 [0,0206-(-0,0015)] мм										0,022 [-0,0204-(-0,0016)] мм				0,0222 [0,0206-(-0,0016)] мм				
Повторяемость позиционирования $R$	0,0065 мм ( $n_i=3$ )										0,0079 мм ( $n_i=2$ )				0,0079 мм ( $n_i=2$ )				
Точность $A$	0,043 [0,0403-(-0,0027)] мм										0,0412 [0,0388-(-0,0024)] мм				0,043 [0,0403-(-0,0027)] мм				

# Геометрическая точность оси Y станка Kondia A-10 по ГОСТ 27843-2006 (ISO 230-2:1997)

Номер заданной позиции $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Целевая позиция $P_i$ , мм	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190	
Направление подрода	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	
Позиционные отклонения, мкм	J=1	0,1 -0,2	-1,3 -1,0	-3,0 -2,8	-4,7 -5,0	-5,7 -6,3	-6,9 -7,8	-8,6 -9,0	-9,8 -10,2	-11,3 -10,9	-12,0 -11,9
	2	0,1 -0,2	-1,3 -1,2	-3,2 -2,8	-4,8 -4,7	-5,9 -6,2	-7,1 -7,5	-8,4 -9,0	-9,7 -10,1	-10,8 -10,9	-11,7 -11,5
	3	0,1 -0,3	-1,3 -1,3	-3,0 -3,0	-4,8 -4,7	-5,9 -6,0	-7,2 -7,5	-8,5 -8,7	-9,6 -9,8	-10,6 -10,7	-11,3 -11,3
	4	0,1 -0,2	-1,2 -1,1	-2,9 -2,7	-4,6 -4,7	-5,8 -6,0	-7,0 -7,3	-8,3 -8,4	-9,5 -9,7	-10,5 -10,5	-11,4 -11,1
	5	0,1 -0,3	-1,1 -1,2	-3,0 -2,8	-4,6 -4,6	-5,7 -5,9	-6,9 -7,2	-8,2 -8,4	-9,4 -9,4	-10,2 -10,4	-11,1 -10,9
Среднее одностороннее позиционное отклонение, $\bar{x}_i$ , МКМ	0,1 -0,2	-1,2 -1,2	-3,0 -2,8	-4,7 -4,7	-5,8 -6,1	-7,0 -7,5	-8,4 -8,7	-9,6 -9,8	-10,7 -10,7	-11,5 -11,3	
Среднеквадратическая неопределенность $s_i$ , мкм	0,0 0,1	0,1 0,1	0,1 0,1	0,1 0,2	0,1 0,2	0,1 0,2	0,2 0,3	0,2 0,3	0,4 0,2	0,4 0,4	
$2s_i$ , мкм	0,0 0,1	0,2 0,2	0,2 0,2	0,2 0,3	0,2 0,3	0,3 0,5	0,3 0,6	0,3 0,6	0,8 0,5	0,7 0,8	
$\bar{x}_i - 2s_i$ , мкм	0,1 -0,3	-1,4 -1,4	-3,2 -3,0	-4,9 -5,0	-6,0 -6,4	-7,3 -7,9	-8,7 -9,3	-9,9 -10,5	-11,5 -11,1	-12,2 -12,1	
$\bar{x}_i + 2s_i$ , мкм	0,2 -0,6	-2,7 -2,5	-6,3 -5,9	-9,6 -9,8	-11,8 -12,5	-14,3 -15,4	-17,1 -18,0	-19,5 -20,3	-22,2 -21,8	-23,7 -23,4	
Повторяемость в одном направлении $R_i = 4s_i$ , мкм	0,0 0,4	0,7 0,9	0,9 0,9	0,8 1,2	0,8 1,3	1,0 1,8	1,3 2,4	1,3 2,6	3,3 1,8	2,8 3,1	
Зона нечувствительности $B_i$ , мкм	0,3	-0,1	-0,2	0,0	0,3	0,4	0,3	0,2	0,0	-0,2	
Повторяемость в двух направлениях позиционирования $R_p$ , мкм	0,4	0,9	0,9	1,2	1,3	1,8	2,4	2,6	3,3	3,1	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$ , мкм	-0,1	-1,2	-2,9	-4,7	-5,9	-7,2	-8,6	-9,7	-10,7	-11,4	
Отклонение оси, мм						Одностороннее ↑			Одностороннее ↓		Двустороннее
Зона нечувствительности $B$						Не применимо			Не применимо		0,0004 мм ( $\forall i=10$ )
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$						Не применимо			Не применимо		0,0001 мм
Среднее двустороннее позиционное отклонение $M$						Не применимо			Не применимо		0,0113 [-0,0001(-0,0114)] мм
Систематическое позиционное отклонение $E$						0,0116 [0,0001(-0,0115)] мм			0,0115 [-0,002(-0,0113)] мм		0,0116 [0,0001(-0,0115)] мм
Повторяемость позиционирования $R$						0,0033 мм ( $\forall i=9$ )			0,0031 мм ( $\forall i=10$ )		0,0033 ( $\forall i=9$ )
Точность $A$						0,0124 [0,0002(-0,0122)] мм			0,0115 [-0,0006(-0,0121)] мм		0,0124 [0,0002(-0,0122)] мм

# Геометрическая точность оси Z станка Kondia A-10 по ГОСТ 27843-2006 (ISO 230-2:1997)

Номер заданной позиции $i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Целевая позиция $P_i$ , мм	5	30	55	80	105	130	155	180	205	230	255	
Направление подхода	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	
Позиционные отклонения, мкм	J=1	-0,1 0,8	1,6 1,9	4,8 4,8	8,0 7,5	10,0 9,7	11,6 10,8	13,0 11,7	13,5 12,4	14,8 13,3	15,2 14,2	15,5 14,7
	2	0,2 0,8	1,2 1,9	4,2 4,6	7,2 7,4	9,7 9,5	11,0 10,9	12,5 11,6	13,4 12,2	14,5 13,0	15,3 13,7	15,8 14,7
	3	0,2 0,8	1,3 1,8	4,2 4,6	7,3 7,4	9,6 9,7	11,3 10,8	12,8 11,7	13,7 12,4	14,4 13,1	14,9 13,4	15,1 14,6
	4	0,1 0,8	1,1 1,8	4,1 4,7	7,2 7,4	9,5 9,6	11,0 10,7	12,5 11,5	13,1 12,0	14,2 12,8	14,7 13,6	15,1 14,3
	5	0,2 0,9	1,3 2,0	4,2 4,7	7,2 7,4	9,4 9,3	11,1 10,5	12,6 11,3	13,3 11,8	14,5 13,0	14,8 14,0	15,1 14,3
Среднее одностороннее позиционное отклонение, $\bar{x}_i$ , МКМ	0,1 0,8	1,3 1,9	4,3 4,7	7,4 7,4	9,6 9,6	11,2 10,7	12,7 11,6	13,4 12,2	14,5 13,0	15,0 13,8	15,3 14,5	
Среднеквадратическая неопределенность $s_i$ , мкм	0,1 0,0	0,2 0,1	0,3 0,1	0,3 0,0	0,2 0,2	0,3 0,2	0,2 0,2	0,2 0,3	0,2 0,2	0,3 0,3	0,3 0,2	
$2s_i$ , мкм	0,3 0,1	0,4 0,2	0,6 0,2	0,7 0,1	0,5 0,3	0,5 0,3	0,4 0,3	0,4 0,5	0,4 0,4	0,5 0,6	0,6 0,4	
$\bar{x}_i - 2s_i$ , мкм	-0,1 0,7	0,9 1,7	3,7 4,5	6,7 7,3	9,2 9,2	10,7 10,4	12,2 11,2	13,0 11,6	14,0 12,7	14,5 13,1	14,7 14,1	
$\bar{x}_i + 2s_i$ , мкм	0,0 1,6	2,2 3,6	8,0 9,2	14,1 14,8	18,8 18,8	21,9 21,2	24,9 22,8	26,4 23,8	28,5 25,7	29,4 26,9	30,0 28,6	
Повторяемость в одном направлении $R_i = 4s_i$ , мкм	1,0 0,4	1,5 0,7	2,3 0,7	2,8 0,4	1,8 1,3	2,0 1,2	1,7 1,3	1,8 2,1	1,7 1,5	2,1 2,6	2,6 1,6	
Зона нечувствительности $B_i$ , мкм	-0,7	-0,6	-0,4	0,0	0,1	0,5	1,1	1,2	1,4	1,2	0,8	
Повторяемость в двух направлениях позиционирования $R_i$ , мкм	1,1	1,5	2,3	2,8	1,8	2,0	1,9	2,2	2,2	2,6	2,6	
Среднее двустороннее позиционное отклонение $\bar{x}_i$ , мкм	0,5	1,6	4,5	7,4	9,6	11,0	12,1	12,8	13,8	14,4	14,9	
Отклонение оси, мм	Одностороннее ↑						Одностороннее ↓			Двустороннее		
Зона нечувствительности $B$	Не применимо						Не применимо			0,0014 мм ( $v = 9$ )		
Средняя зона нечувствительности $\bar{B}$	Не применимо						Не применимо			0,0004 мм		
Среднее двустороннее позиционное отклонение $M$	Не применимо						Не применимо			0,00154 [0,0149-(0,0005)] мм		
Систематическое позиционное отклонение $E$	0,0152 [0,0153-(0,0001)] мм						0,0137 [0,0145-(0,0008)] мм			0,0152 [0,0153-(0,0001)] мм		
Повторяемость позиционирования $R$	0,0028 мм ( $v = 4$ )						0,0026 мм ( $v = 10$ )			0,0028 мм ( $v = 4$ )		
Точность $A$	0,0301 [0,0300-(0,0001)] мм						0,0279 [0,0286-(0,0007)] мм			0,0301 [0,0300-(0,0001)] мм		

# Сертификаты калибровки станков

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС)  
Russian Research Institute for Metrological Service (VNIIMS)

QSF-R18\*  
COOMET

CIPM MRA

## Сертификат калибровки Calibration certificate

Номер сертификата RU-04-203-03-2013    Дата калибровки 06.02.2013    Страница 1 из 2  
Certificate number    Date when calibrated    Page of

Объект калибровки Трёхкоординатный фрезерный обрабатывающий центр Kondia A-10 серийный номер В-8103 (как трёхкоординатное средство измерений)  
Item calibrated    Description of measurement standard / measuring instrument / identification

Заказчик ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», г. Москва  
Customer    Information on customer, address  
Name of the customer, address

Метод калибровки указан в методике № 064-2010  
Method of calibration    Name of the method / identification

Все измерения выполнены в соответствии с единицами Международной системы СИ, которые воспроизводятся национальными эталонами ВНИИМС. В сертификате приведены результаты калибровки, соответствующие в Приложении С соглашения МРА, разработанного МСМВ. В рамках МРА все участники ВНИИМС единым образом обеспечивают действительность своих сертификатов калибровки в измерений в отношении измерительных точек, диапазонов и метрологической компетенции, указанных в Приложении С (подробности см. <http://www.bipm.org>). Данный сертификат может быть воспроизведен только полностью. Любая публикация или частичное воспроизведение содержания сертификата возможны с письменного разрешения ВНИИМС, выдавшего сертификат.

All measurements are traceable to the SI units which are realized by national measurement standards of VNIIMS. In the certificate, the calibration results corresponding to the requirements of Appendix C of the MRA drawn up by the CIPM. Under the MRA, all participating NMIs recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>). This certificate shall not be reproduced, except in full. Any publication extracts from the calibration certificate requires written approval of the VNIIMS.

Заместитель директора Иванов В.Ю.    Дата выдачи 06.02.2013  
Deputy Director    Name and function    Date of issue

\*QSF-R18: Свидетельство о признании системы менеджмента качества в соответствии с требованиями ИСО/МЭК 17025 выдано 14.10.2010 г. ТК Форума качества COOMET сроком действия до 14.10.2015 г.  
Confirmation of recognition of Quality Management System in accordance with the Standard ISO/IEC 17025 is given on 14/12/2010 by Technical Committee of the COOMET Quality Forum and is valid until October 14, 2015.

Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, дом 46  
Тел.: +7 495 437 5577    Факс: +7 495 437 5666    E-mail: Office@vniims.ru    www.vniims.ru

110110

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС)  
Russian Research Institute for Metrological Service (VNIIMS)

QSF-R18\*  
COOMET

CIPM MRA

## Сертификат калибровки Calibration certificate

Номер сертификата RU-04-203-02-2013    Дата калибровки 06.02.2013    Страница 1 из 2  
Certificate number    Date when calibrated    Page of

Объект калибровки Трёхкоординатный фрезерный обрабатывающий центр Kondia A-10 серийный номер В-8057 (как трёхкоординатное средство измерений)  
Item calibrated    Description of measurement standard / measuring instrument / identification

Заказчик ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», г. Москва  
Customer    Information on customer, address  
Name of the customer, address

Метод калибровки указан в методике № 064-2010  
Method of calibration    Name of the method / identification

Все измерения выполнены в соответствии с единицами Международной системы СИ, которые воспроизводятся национальными эталонами ВНИИМС. В сертификате приведены результаты калибровки, соответствующие в Приложении С соглашения МРА, разработанного МСМВ. В рамках МРА все участники ВНИИМС единым образом обеспечивают действительность своих сертификатов калибровки в измерений в отношении измерительных точек, диапазонов и метрологической компетенции, указанных в Приложении С (подробности см. <http://www.bipm.org>). Данный сертификат может быть воспроизведен только полностью. Любая публикация или частичное воспроизведение содержания сертификата возможны с письменного разрешения ВНИИМС, выдавшего сертификат.

All measurements are traceable to the SI units which are realized by national measurement standards of VNIIMS. In the certificate, the calibration results corresponding to the requirements of Appendix C of the MRA drawn up by the CIPM. Under the MRA, all participating NMIs recognize the validity of each other's calibration and measurement certificates for the quantities, ranges and measurement uncertainties specified in Appendix C (for details see <http://www.bipm.org>). This certificate shall not be reproduced, except in full. Any publication extracts from the calibration certificate requires written approval of the VNIIMS.

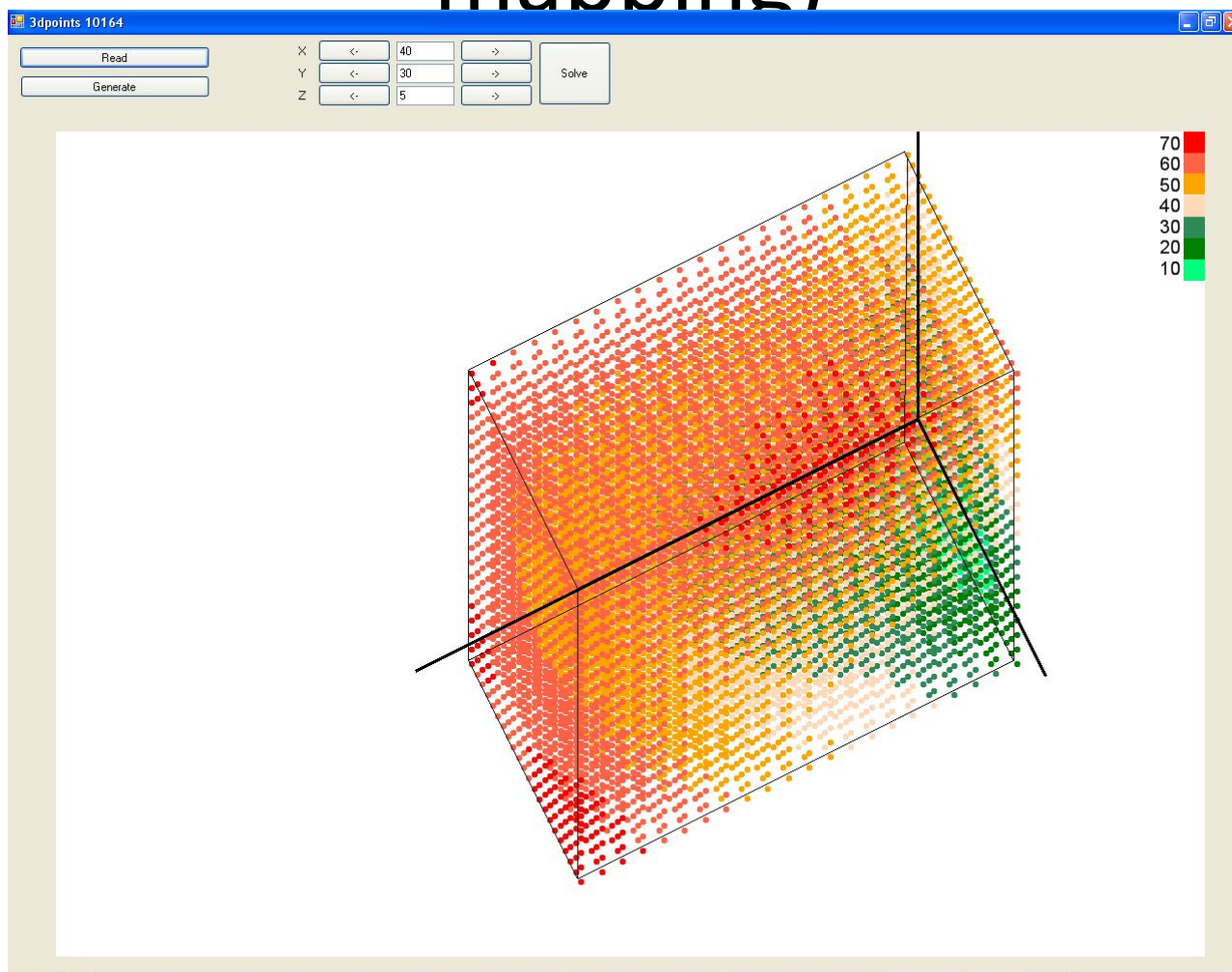
Заместитель директора Иванов В.Ю.    Дата выдачи 06.02.2013  
Deputy Director    Name and function    Date of issue

\*QSF-R18: Свидетельство о признании системы менеджмента качества в соответствии с требованиями ИСО/МЭК 17025 выдано 14.10.2010 г. ТК Форума качества COOMET сроком действия до 14.10.2015 г.  
Confirmation of recognition of Quality Management System in accordance with the Standard ISO/IEC 17025 is given on 14/12/2010 by Technical Committee of the COOMET Quality Forum and is valid until October 14, 2015.

Россия, 119361, Москва, ул. Озерная, дом 46  
Тел.: +7 495 437 5577    Факс: +7 495 437 5666    E-mail: Office@vniims.ru    www.vniims.ru

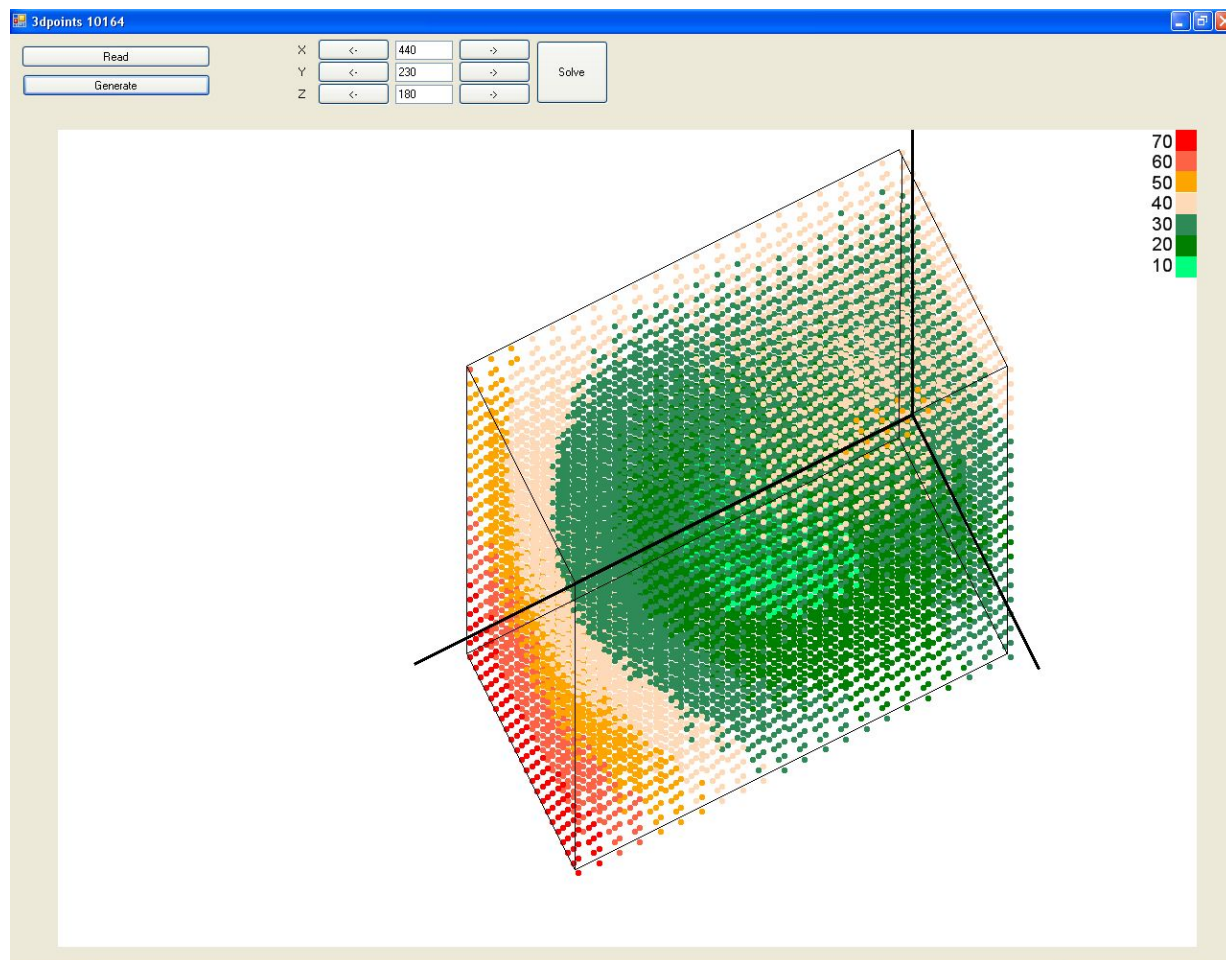
110109

# Распределение погрешности в рабочем пространстве станка (Error mapping)

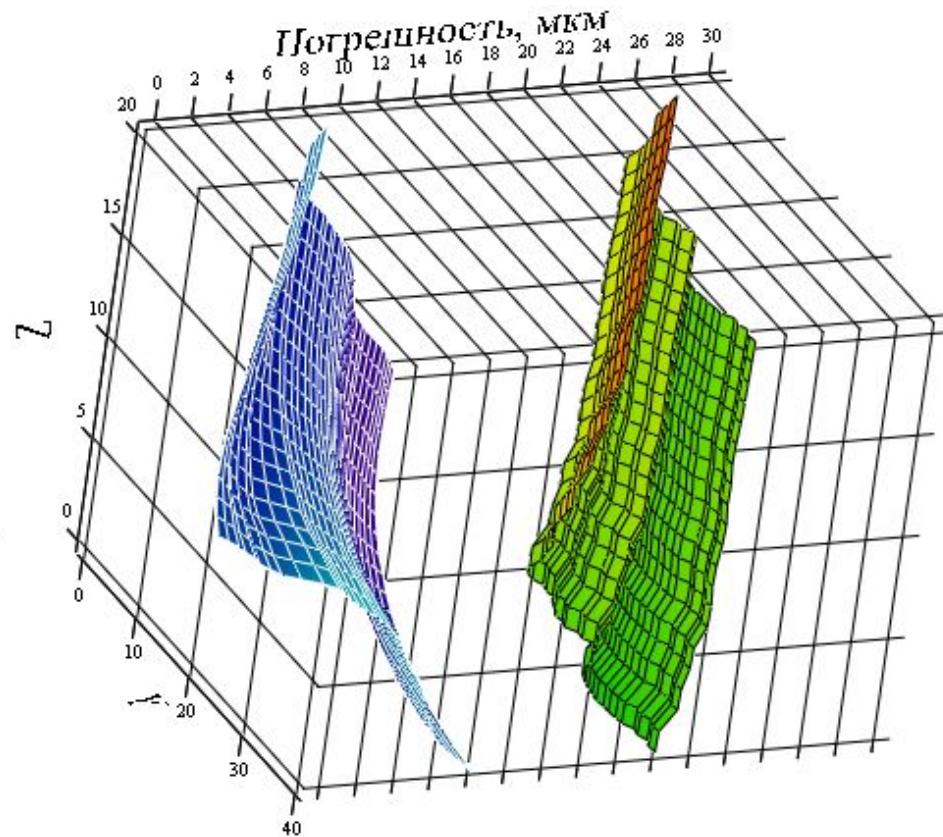
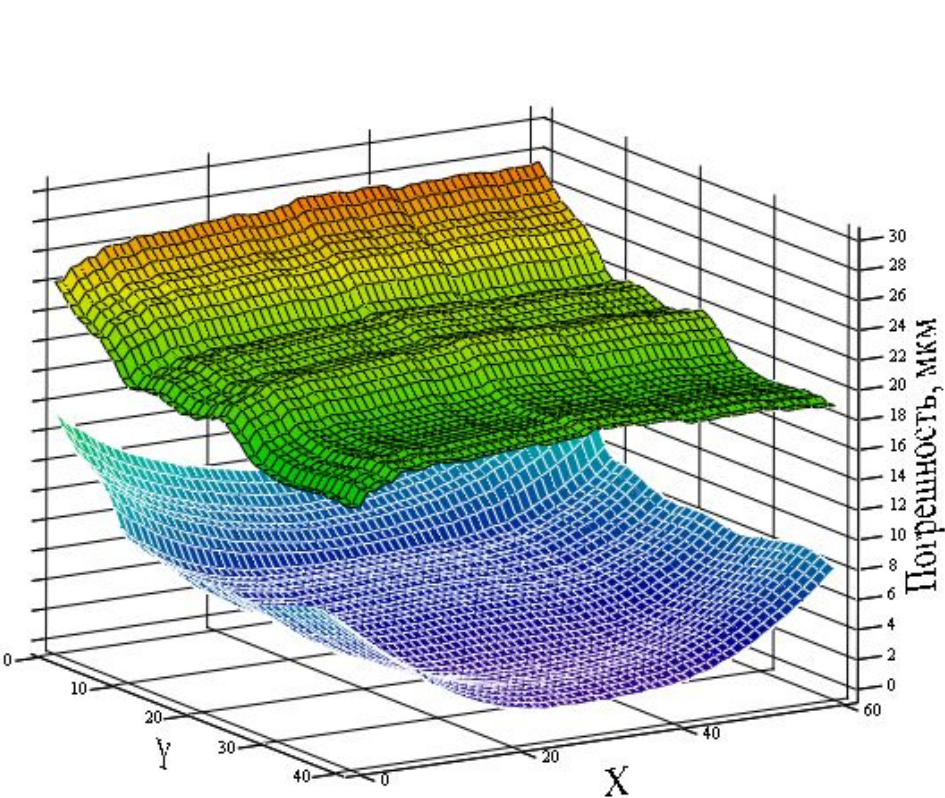




# Лазерная коррекция объёмных геометрических погрешностей в рабочем пространстве

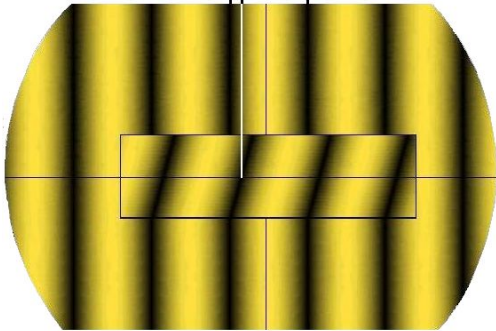


# Коррекция погрешности в разных направлениях обработки

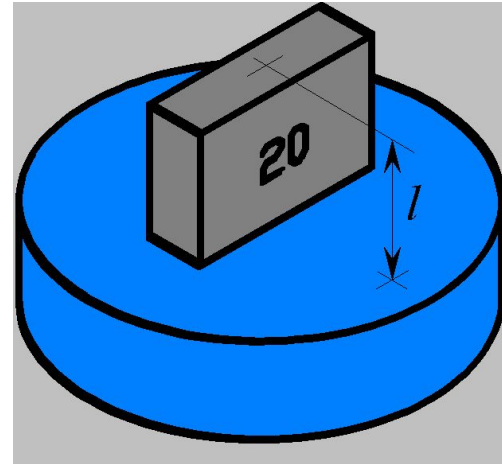


# Интерферометр Кестерса

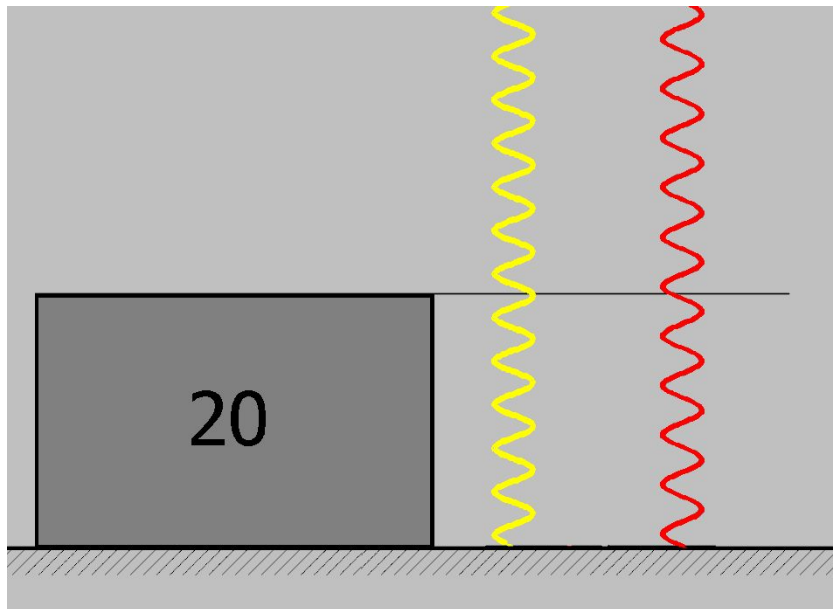
$$\frac{f}{b} = 0.167$$



Поле зрения интерферометра



Объект измерения –  
концевая  
мера длины,  
притёртая к  
стеклянной  
пластине



Сравнение КМД с длиной волны света

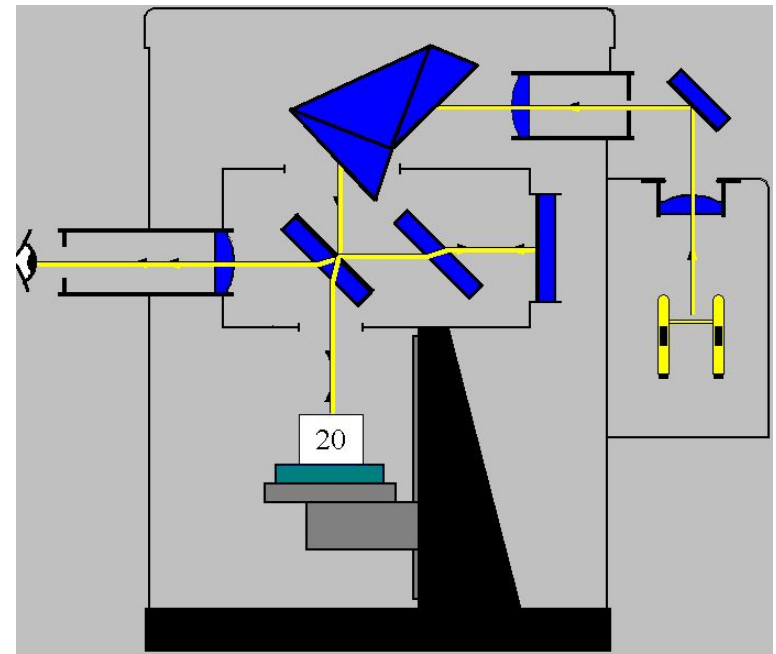


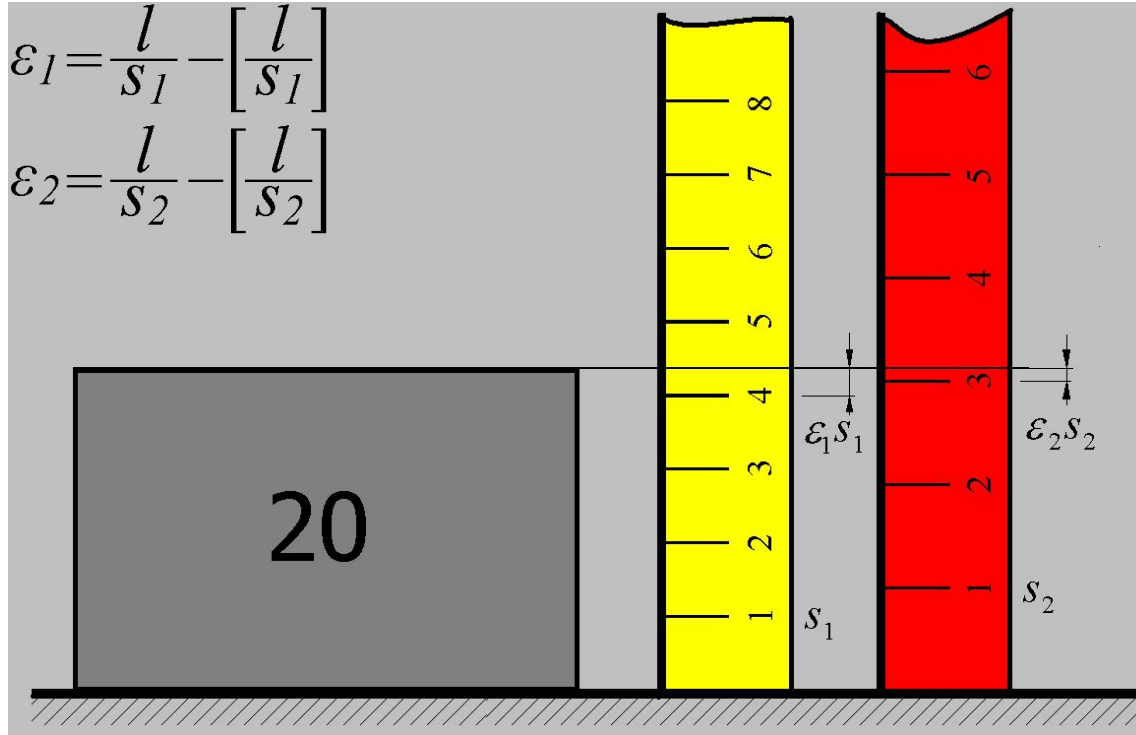
Схема прибора



# Метод совпадения

$$\varepsilon_1 = \frac{l}{s_1} - \left[ \frac{l}{s_1} \right]$$

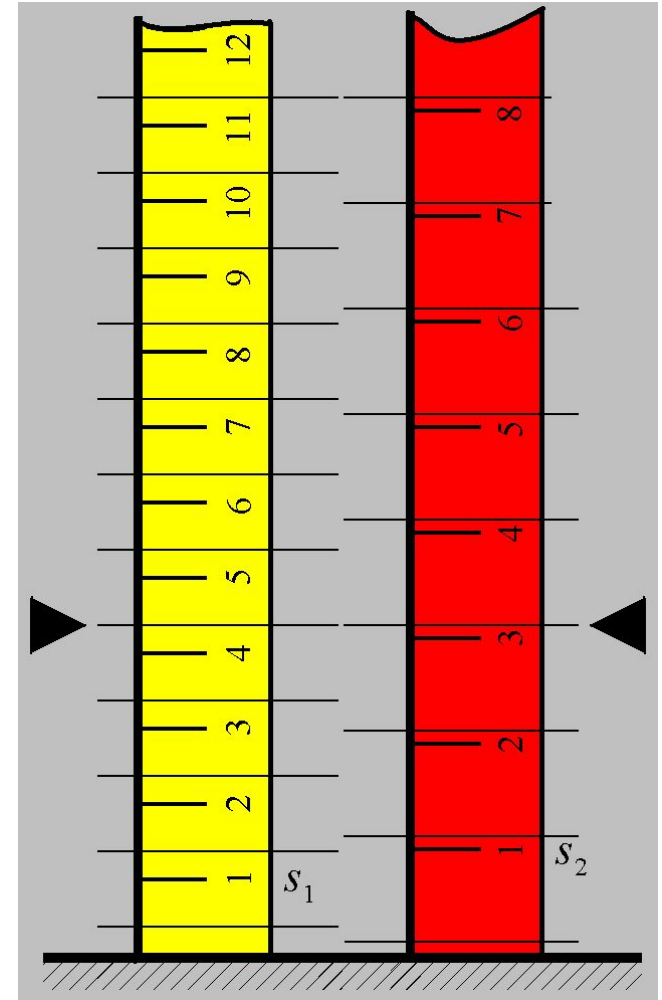
$$\varepsilon_2 = \frac{l}{s_2} - \left[ \frac{l}{s_2} \right]$$



Длина  $l=20$  отсекает дробные доли  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$   
от целых шагов шкал  $s_1$  и  $s_2$

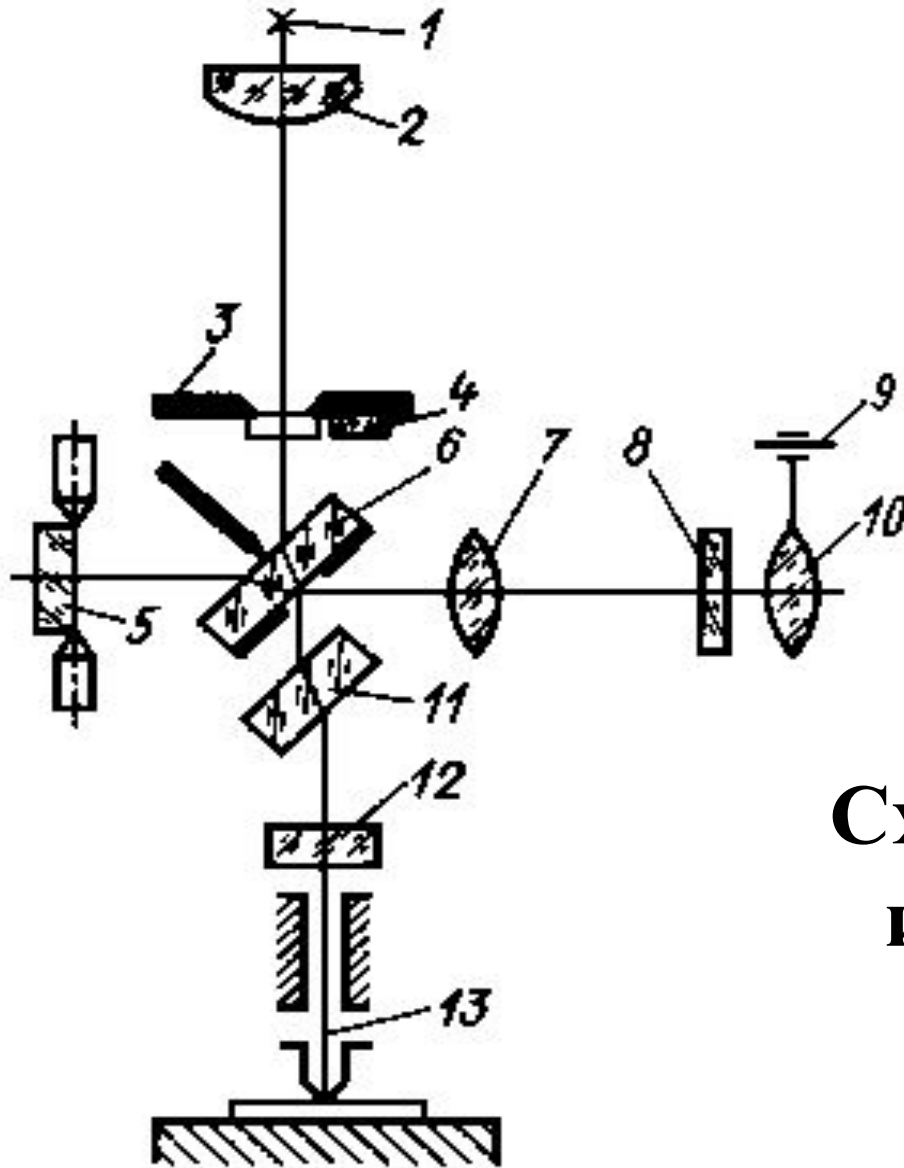
$$l = (n_1 + \varepsilon_1)s_1 = (n_2 + \varepsilon_2)s_2$$

При измерениях дробные доли  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$   
отсчитывают по смещению интерференционных  
полос на КМД и стеклянной пластине



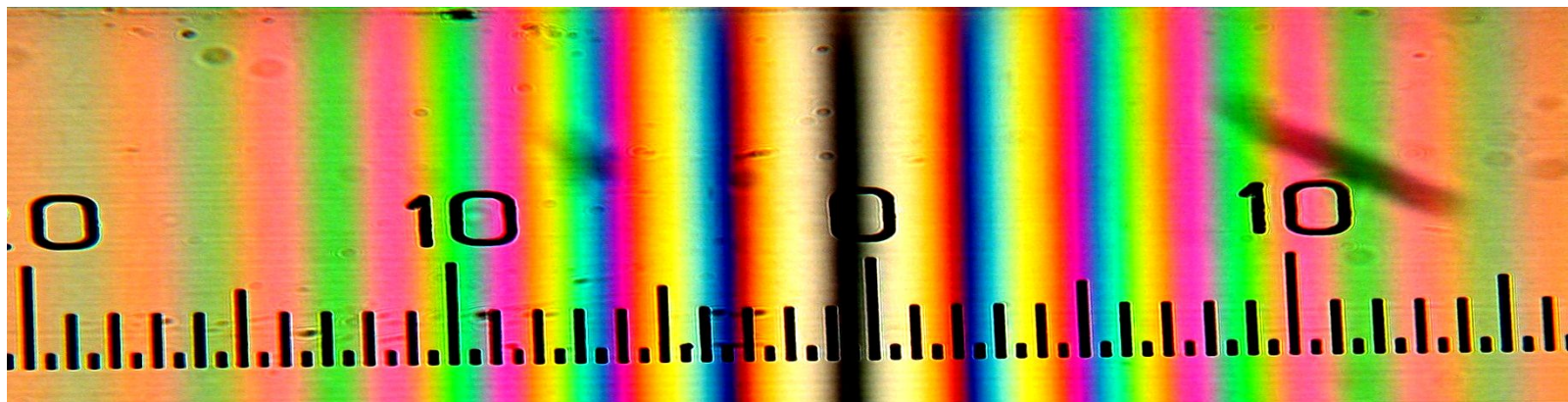
Перебирая возможные наборы  
целых шагов определяя  $n_1$  и  $n_2$ ,  
при которых отсчёты по обоим  
шкалам совпадают

# Интерферометрия белого света с цифровой обработкой информации

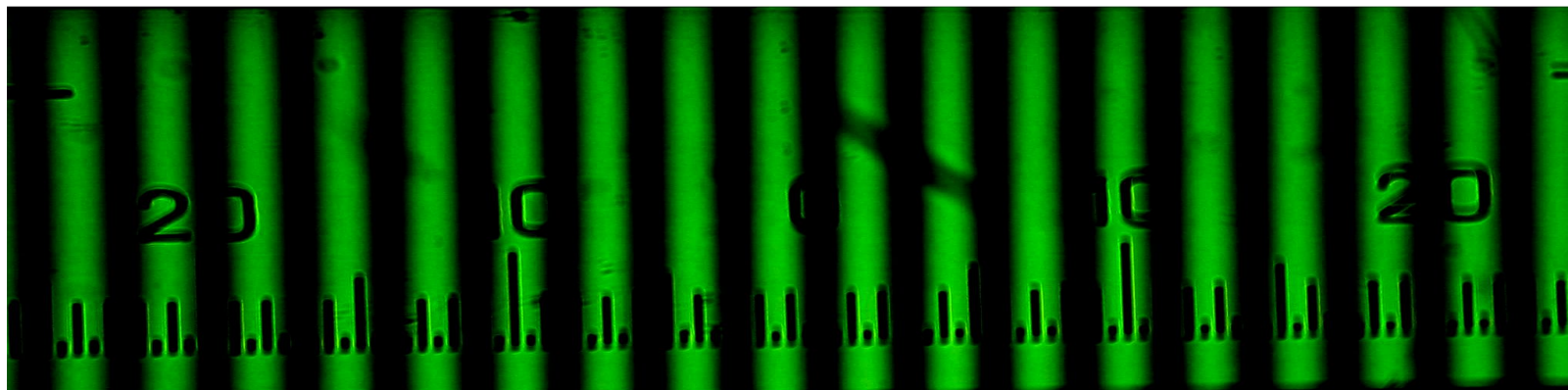


**Схема контактного  
интерферометра**

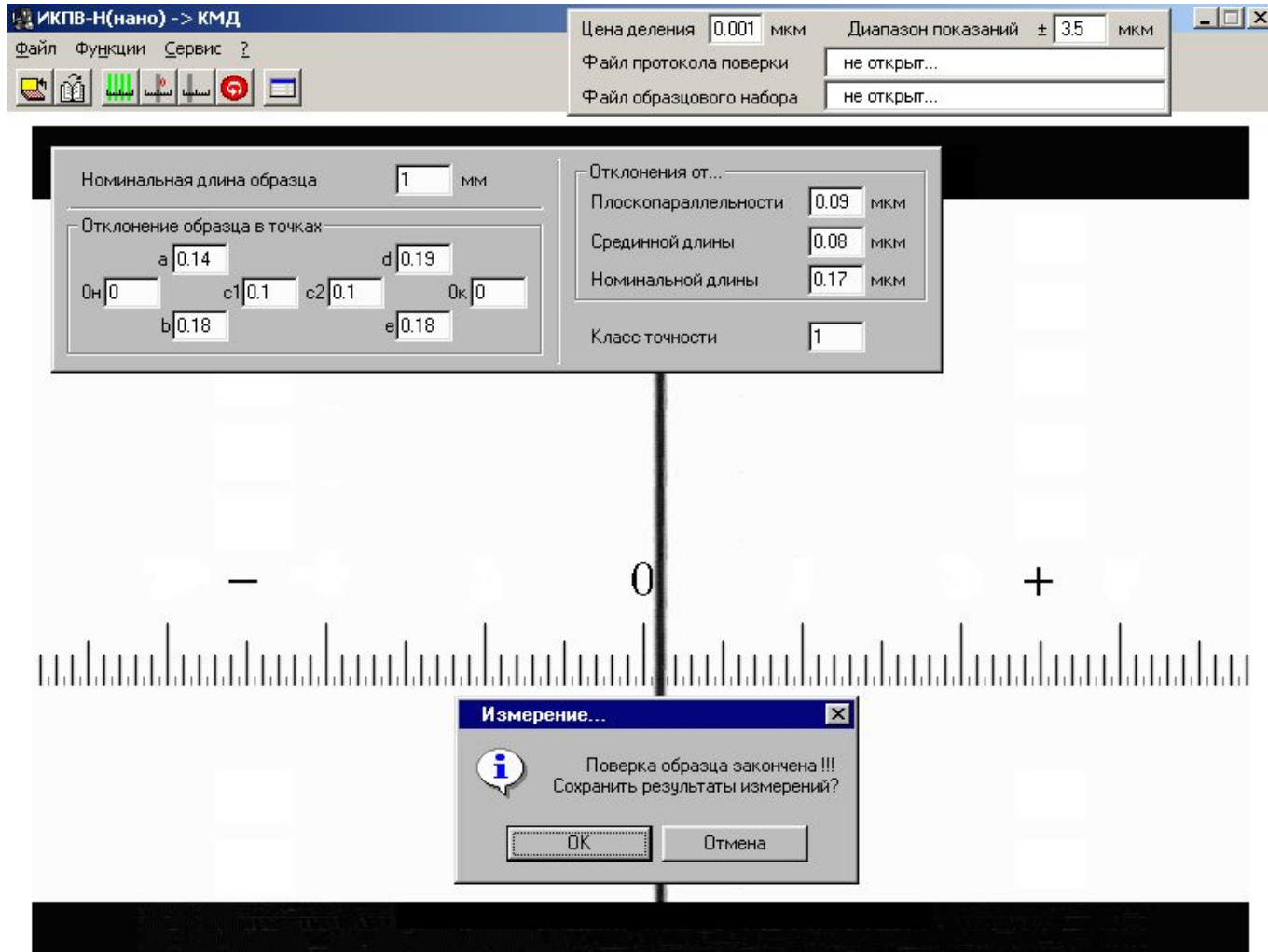
# Цветная интерференционная картина с ахроматической полосой на фоне шкалы



Режим юстировки с интерференционной картиной в зелёном свете на фоне шкалы интерферометра



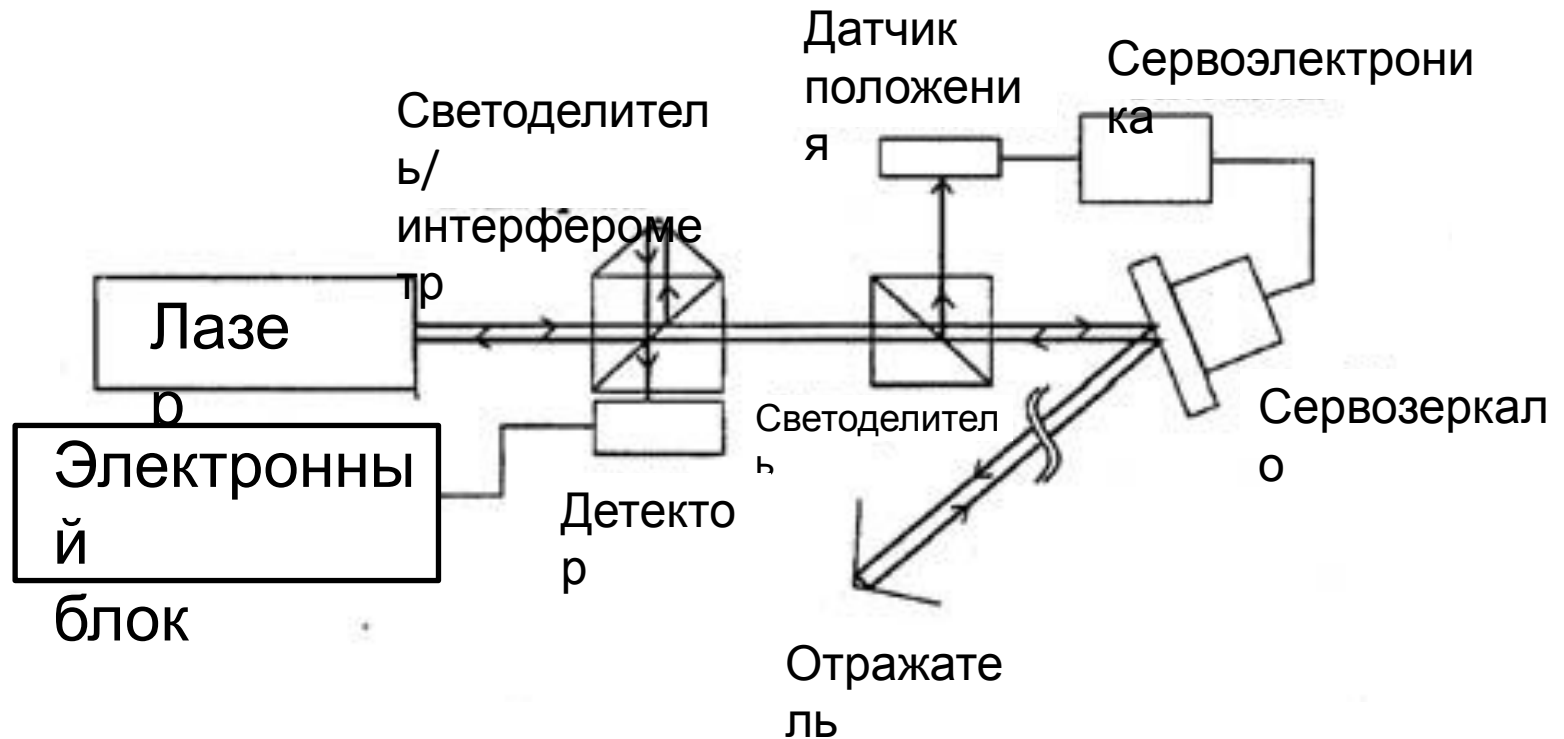
# Шкала интерферометра с ахроматической полосой



# Следящие лазерные интерферометры (лазер-трекеры) для контроля геометрических параметров

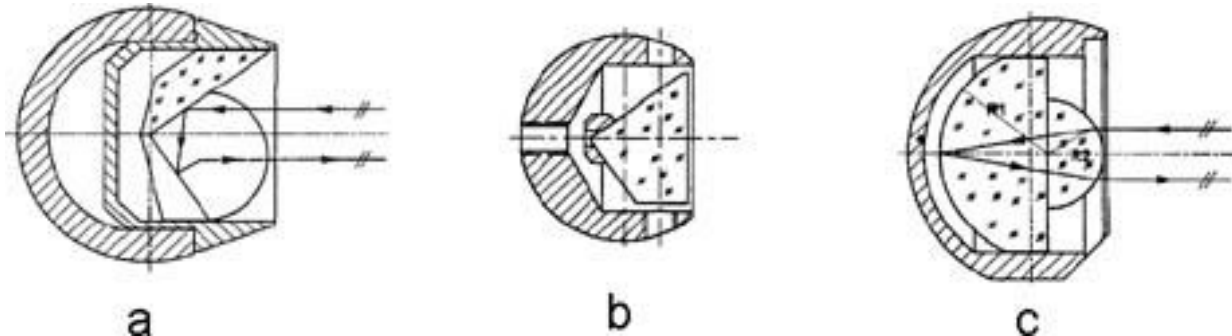


# Устройство лазер-трекера



to track (англ.) – следить

# Устройство отражателей



а. Зеркальный угол куба

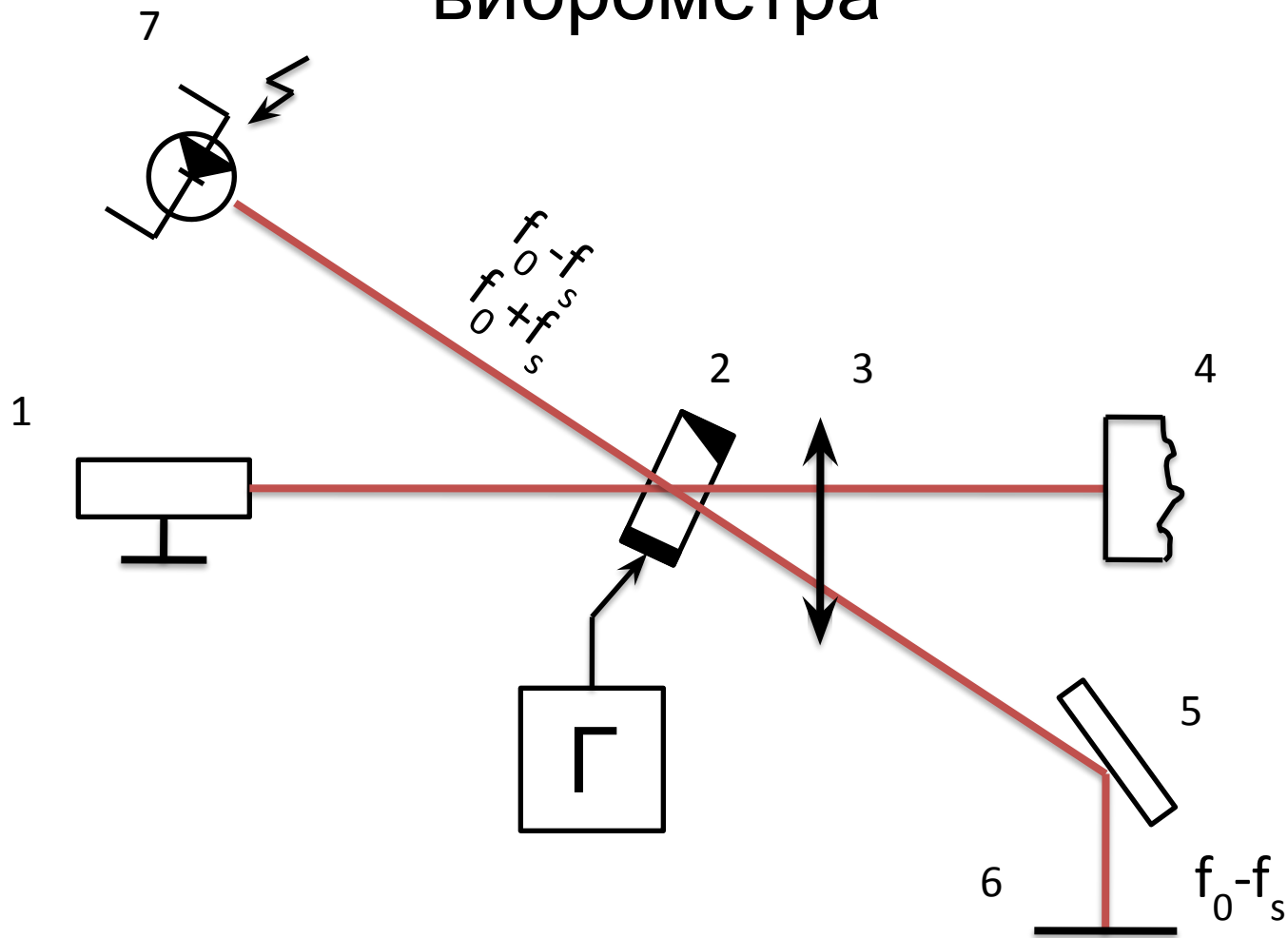
б. Стеклянный угол куба

с. «Кошачий глаз»

Отклонение от сферичности - 1 мкм



# Схема сканирующего лазерного виброметра



1 – лазер, 2 – брэгговский акустооптический преобразователь частоты света, 3 – линза, 4 – объект, 5,6 – зеркало, 7 - фотоприёмник



# Измерение динамических напряжений в турбинной лопатке, установленной на вибростенде



# Поле напряжений турбинного диска

