

$$x = n\Delta x$$

$$y = k\Delta y$$

Предел разрешающей способности можно ориентировочно оценить из следующих соображений. Для того, чтобы ограничить влияние шумов, произведем усечение ряда, принимая во внимание лишь N членов ряда, где $N = i_{кр}$. Тогда $N = \frac{2a\omega_2}{\pi} = 4av_2$ (3)

Из общих свойств БПФ следует, что любая координатная функция ψ_i ряда точно i раз обращается в нуль на интервале $(-a, a)$. Это позволяет принять за численную меру разрешения, достигаемого при сохранении N членов разложения, среднее расстояние ρ между нулевыми значениями последней координатной функции ψ_N усеченного ряда на рассматриваемом интервале:

$$\rho = \frac{2a}{(N+1)} = \frac{2a}{4av_2+1}, \quad (4)$$

поскольку $4av_2 \gg 1$, получается $\rho = \frac{1}{2v_2}$, т. е. разрешение совпадает с обычной оцен-

кой разрешающей способности реального прибора, имеющего полосу пропускания $2v_2$.

Список литературы

1. Р. Бейтс, Н. Мак-Доннелля, М. Мак-Доннелля. Восстановление и реконструкция изображений. – М.: Мир, 1989.
2. А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1996.
3. У.К. Прэтт. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982.
4. Ю.В. Ланник. Статистические задачи с мешающими параметрами. – М.: Наука, 1966.

ОПТИКОЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

*Н.А. Агапов, Д.Н. Агапов, г. Северск, Россия
В.В. Мевкус, О.В. Бояринов, г. Северск, Россия,
В.К. Кулешов, г. Томск, Россия*

Описывается линзовый эндоскоп для дистанционного визуального эндоскопа, используемого для дистанционного визуального контроля основного технологического оборудования: трубопроводов, сосудов, емкостей и т. д., в условиях затрудненного доступа к нему.

Для дистанционного визуального контроля основного технологического оборудования – трубопроводов, сосудов, емкостей и т. п. – в условиях затрудненного доступа к нему и/или наличия опасных и вредных производственных факторов на предприятиях атомной промышленности применяются линзовые эндоскопы. Типовая оптическая схема эндоскопа показана на рис. 1.

Откидное поворотное зеркало 5 позволяет производить либо визуальное наблюдение объекта контроля, либо на мониторе персонального компьютера (ПК). На основе приведенной оптической схемы в лаборатории металловедения Сибирского химического комбината (СХК) был разработан и изготовлен оптикоэлектронный прибор ПВК-58 (рис. 2). Эндоскоп собирается из отдельных звеньев: одно формирующее с объективом 3 и до 14 рабочих (обо-

рачивающая система 4). Звенья стыкуются с помощью резьбовых узлов, обеспечивающих его жесткость и герметичность. Водонепроницаемость разъемных соединений достигается использованием уплотняющих колец из температуро- и радиационнотстойкой резины. Все элементы электрической цепи эндоскопа расположены внутри звеньев, насадок и видеомодуля. В состав видеомодуля входят также аналоговая камера 7, объектив 6, формирующий изображение на матрице камеры 7 и двигатели, обеспечивающие: вращение камеры 7 для необходимой ориентации изображения, перемещение объектива 6 для настройки на резкость и управление компенсатором «залунения». Оптика эндоскопа изготовлена из специального радиационнотстойкого оптического стекла. Прибор оснащен комплектом из четырех сменных объективов 2 с разными фокусными расстояниями – 20, 40, 70 и 130 мм – и двумя оптическими насадками – боковой и торцевой. Насадки выполняют функции осветителей и защитных окон. Откидное зеркало 5 расположено в отдельном узле – Т-образном звене. Блок питания и управления прибора обеспечивает дистанционное управление напряжением ламп подсветки, вращением камеры, настройкой резкости изображения и встроенным компенсатором «залунения». Общая схема сборки прибора показана на рис. 2.

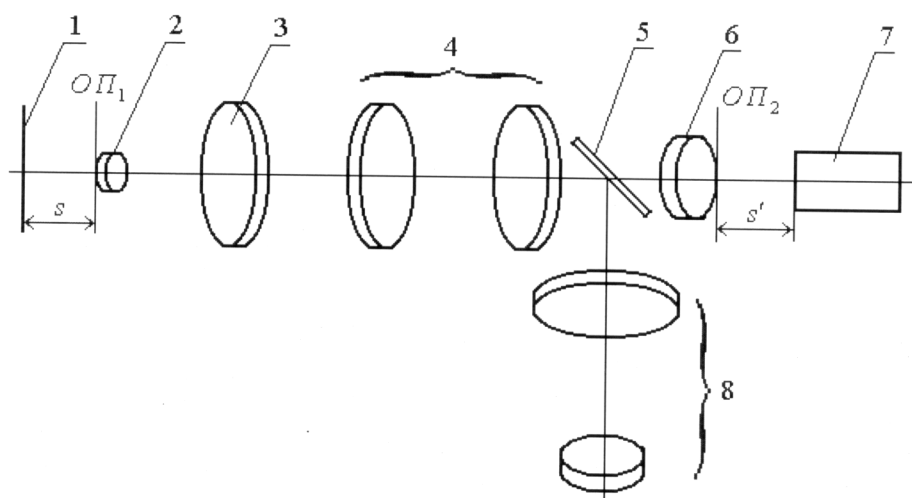


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема линзового эндоскопа. 1 – объект контроля; 2, 3 – объективы; 4 – оборачивающая телескопическая система с угловым увеличением $\gamma = -1$; 5 – поворотное откидное зеркало; 6 – объектив; 7 – камера; 8 – зрительная труба для визуального наблюдения

Одна из основных задач визуального и измерительного контроля – это измерение линейных размеров обнаруженных дефектов, а также измерение геометрических размеров элементов и узлов конструкций, расположенных внутри исследуемых объектов. Существующие методы измерения – теневые, триангуляции, сканирующие системы, фотограмметрические и другие – мало пригодны или совсем непригодны для использования их в эндоскопических системах. В связи с этим в лаборатории металловедения СХК была разработана и изготовлена оптикоэлектронная система (видеомодуль), позволяющая производить измерение геометрических размеров объектов контроля как сама по себе, так и совместно с эндоскопом или любой другой оптической системой, сопряженной с видеомодулем. В основе алгоритма заложено матричное описание оптической системы в параксиальном приближении. Как известно [1], все основные свойства оптической системы описываются матрицей M преобразования лучей между опорными плоскостями $ОП_1$ и $ОП_2$ (рис. 1):

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}, \quad (1)$$

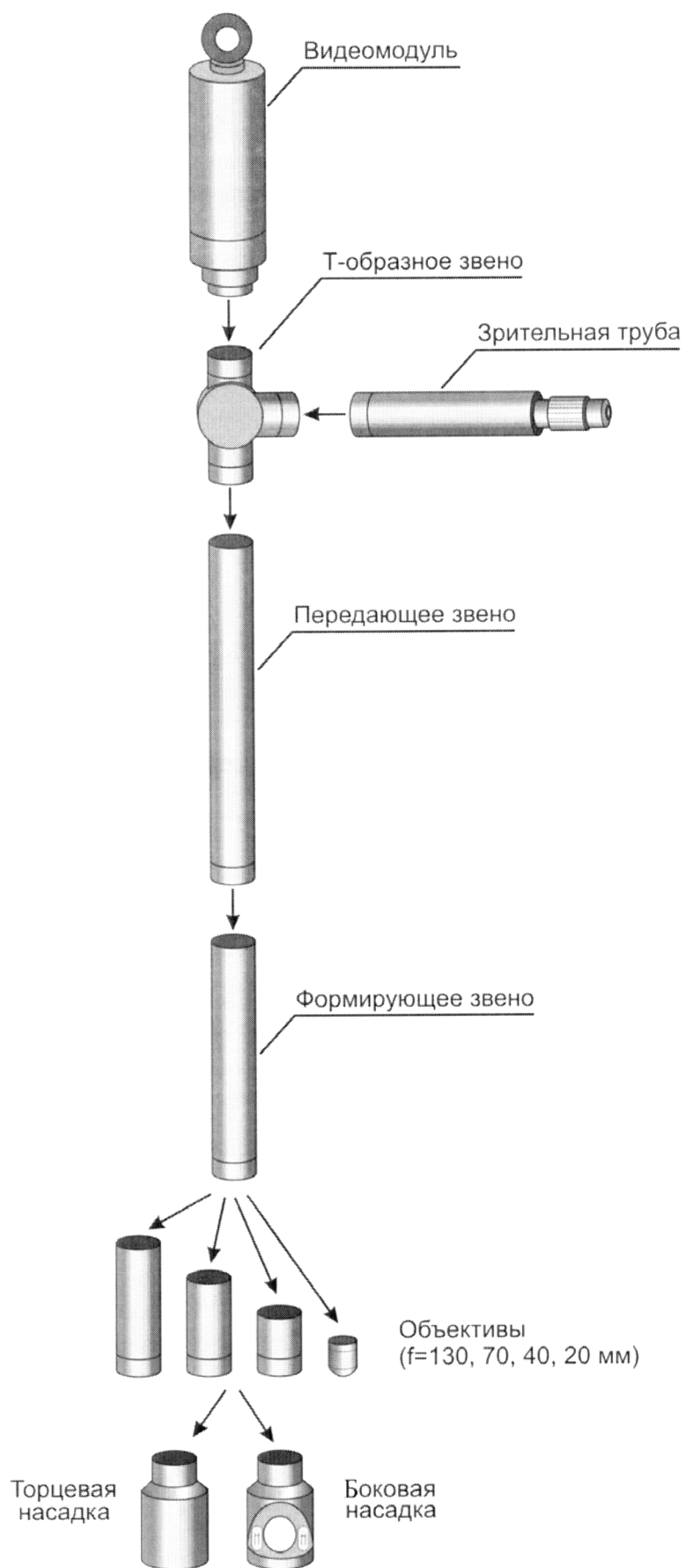


Рис. 2. Общая схема сборки прибора ПВК-58

матричные элементы которой вычисляются по конструктивным параметрам оптической системы, каковыми являются радиусы кривизны оптических поверхностей, расстояния между вершинами поверхностей и показатели преломления стекол. Зная матрицу M , можно рассчитать положение сопряженных плоскостей, которыми в нашем случае являются поверхность объекта контроля 1 и ПЗС-матрица камеры 7:

$$s = \frac{B + s' \cdot D}{A + s' \cdot C}, \quad (2)$$

где s – расстояние от объекта контроля 1 до опорной плоскости $ОП_1$;

s' – расстояние от опорной плоскости $ОП_2$ до ПЗС-матрицы камеры 7. Оператор визуально, по изображению на экране монитора, настраивается на резкость, управляя приводом объектива 6, который осуществляет перемещение объектива 6 относительно ПЗС-матрицы. Величина перемещения Δz измеряется, что позволяет определить расстояние s' : $s' = s'_{F'} + \Delta z$, где $s'_{F'}$ – задний фокальный отрезок оптической системы, который вычисляется по формуле:

$$s'_{F'} = -\frac{A}{C}. \quad (3)$$

Расстояние s до объекта контроля 1 рассчитывается по формуле 2. Далее оператор курсором отмечает на изображении две точки, расстояние между которыми необходимо измерить, а программное обеспечение выполняет расчет реального расстояния $\Delta x'$ между указанными точками на ПЗС-матрице. Зная s' и $\Delta x'$, можно рассчитать линейное увеличение α оптической системы и реальное расстояние Δx между указанными точками на объекте контроля 1:

$$\alpha = A + s' \cdot C, \quad \Delta x = \frac{\Delta x'}{\alpha}. \quad (4)$$

Очевидно, что измерение геометрических размеров и расстояния до объекта контроля производится с определенной погрешностью, обусловленной действием нескольких факторов. Рассмотрим эти факторы:

- 1) погрешности, обусловленные точностью изготовления деталей (в том числе и оптических) и точностью сборки узлов и прибора в целом. Погрешности данного типа достаточно просто определяются расчетным путем в каждом конкретном случае в зависимости от отклонения конструктивных параметров от расчетных значений;
- 2) погрешность, обусловленная точностью измерения фокусного расстояния объектива 6, в качестве которого использовался стандартный проекционный объектив с фокусным расстоянием 92 мм, конструктивные параметры которого были неизвестны. Ниже (рис. 3) приведен график зависимости абсолютной погрешности измерения δx геометрических размеров объекта контроля величиной 50 мм от расстояния s , рассчитанный на примере указанного проекционного объектива. Погрешность измерения $\delta f'$ фокусного расстояния объектива 6 принята равной ± 0.1 мм;
- 3) погрешность, обусловленная глубиной изображаемого пространства. Как известно, наличие глубины изображаемого пространства объясняется дискретной структурой фотоприемника, а расстояние между передним и задним планами изображаемого пространства определяется расстоянием δ' между соседними сенсорами фотоприемника. На рис. 4 приведен график зависимости абсолютной погрешности, обусловленной глубиной изображаемого пространства, в измерении координаты точки объекта контроля в зависимости от расстояния s до объекта контроля. Расчеты проведены также на примере проекционного объектива с фокусным рас-

стоянием 92 мм и апертурой 30 мм. Расстояние между сенсорами принято равным $\delta' = 10$ мкм, величина измеряемого объекта – 50 мм;

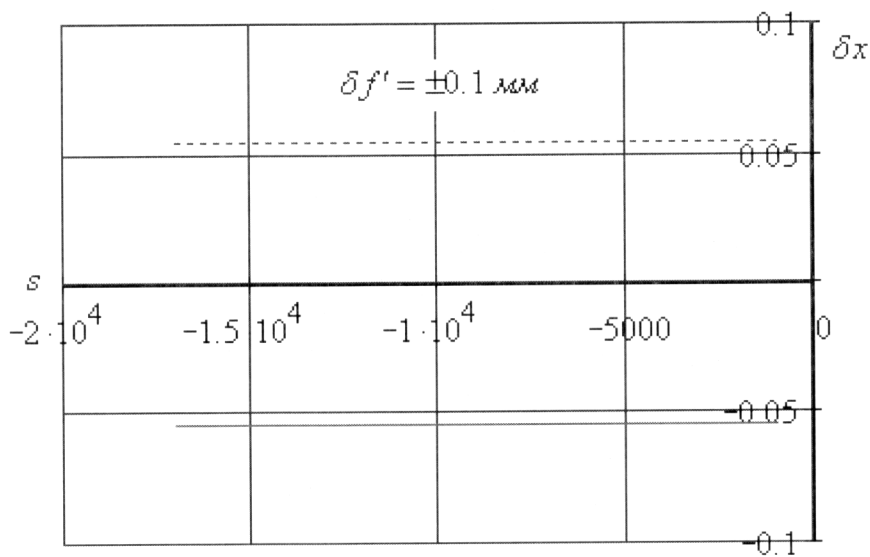


Рис. 3. График зависимости погрешности измерения δx , обусловленной точностью измерения фокусного расстояния объектива, от расстояния s ; $x = 50$ – величина предмета

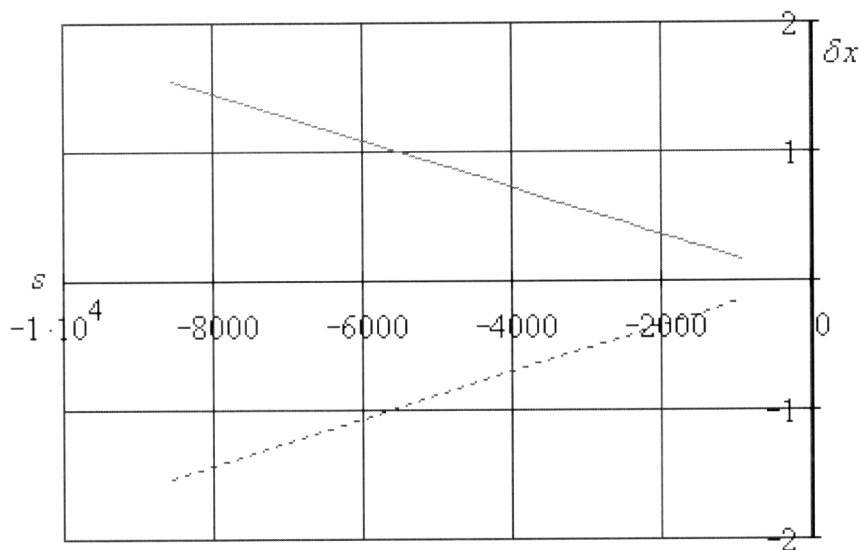


Рис. 4. График зависимости погрешности измерения δx , обусловленной глубиной изображаемого пространства, от расстояния s ; $x = 50$ – величина предмета

- 4) погрешность, обусловленная точностью измерения величины изображения на ПЗС-матрице камеры 7. Будем считать для определенности, что выбранные точки на изображении объекта контроля отмечаются курсором с точностью до одного сенсора. Положим, что расстояние между сенсорами $\delta' = 10$ мкм. Соответствующий график зависимости абсолютной погрешности от расстояния до объекта контроля величиной 50 мм, рассчитанный для проекционного объектива с фокусным расстоянием 92 мм, приведен на рис. 5.

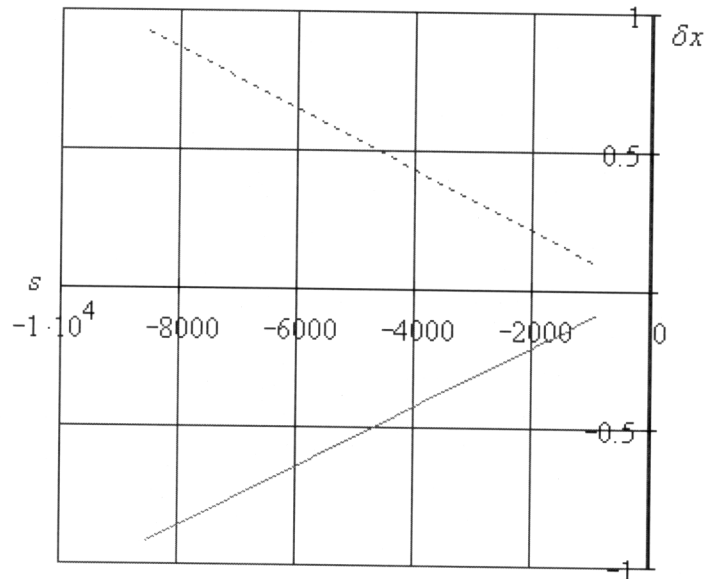


Рис. 5. График зависимости погрешности измерения Δx , обусловленной точностью измерения величины изображения, от расстояния s ; $x = 50$ – величина предмета

Реальные погрешности измерения, полученные при работе на макете прибора, полностью коррелируют с расчетными значениями. В заключение следует отметить, что рассмотренные причины возникновения погрешностей измерения в равной степени относятся ко всем оптическим методам дистанционных измерений геометрических размеров.

Список литературы

1. Джеррад А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. – М.: Мир, 1978. – 341 с.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ КОРУНДОВ ПОДПЯТНИКОВ

*Н.А. Агапов, Д.Н. Агапов, г. Северск, Россия
В.В. Мевуус, О.В. Бояринов, г. Северск, Россия
В.К. Кулешов, г. Томск, Россия*

Для осуществления ряда сложных технологических процессов на промышленных предприятиях используются центрифуги. Один из наиболее ответственных узлов центрифуг – опорная пара, основным элементом которой является подпятник, изготовленный из одноосного кристалла – корунда. На заводе – изготовителе производится жесткий контроль подпятников в поляризационном микроскопе по коноскопической картине в проходящем свете.

Для осуществления ряда сложных технологических процессов на промышленных предприятиях используются центрифуги. Один из наиболее ответственных узлов центрифуг – опорная пара, основным элементом которой является подпятник, изготовленный из одноосного кристалла – корунда. Подпятник представляет собой диск диаметром 3 мм со сферой на опорной поверхности. Наибольшей механической прочностью подпятник обладает при угле между главной оптической осью и осью симметрии, равном $60^\circ \pm 10^\circ$.