

---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 681.78

Н. В. СМИРНОВ, А. В. ПРОКОФЬЕВ

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ СУБМИКРОННОЙ ТОЧНОСТИ

Рассматривается инкрементный оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности, предназначенный для комплектации многокоординатного механообрабатывающего оборудования. Приведены результаты измерения погрешности преобразователя.

*Ключевые слова:* линейные перемещения, оптико-электронный преобразователь перемещений, дифракционная решетка.

**Введение.** Повышение точности механической обработки деталей на промышленном оборудовании — одна из актуальных проблем современного машиностроения. При этом точность обработки зависит от точности позиционирования исполнительного элемента относительно обрабатываемой детали: фактически задача сводится к необходимости контроля их взаимного положения.

Обеспечить необходимую точность при высоких скоростях перемещения обрабатываемых деталей и исполнительных механизмов станков, сохранив при этом уровень надежности и работоспособности, в большинстве случаев возможно только при использовании преобразователей линейных перемещений. Применение в составе данного оборудования лазерных интерферометрических измерительных систем, в силу их высокой стоимости, трудоемкости настройки, а также малой температурной и динамической устойчивости, нецелесообразно. Таким образом, разработка линейных преобразователей для контроля позиционирования исполнительных механизмов промышленных станков является крайне важной задачей, что обуславливает актуальность прикладных исследований для создания линейных преобразователей субмикронной точности.

В настоящее время единственная модель, удовлетворяющая потребности отечественного высокоточного машиностроения (до 200 мм), — преобразователь МТ 101 К производства компании “Heidenhain” (Германия). Среди отечественных преобразователей подобных приборов не существует [1].

Настоящая статья посвящена решению задачи контроля позиционирования исполнительных механизмов промышленного оборудования с применением инкрементного оптико-электронного преобразователя линейных перемещений субмикронной точности.

**Конструкция преобразователя.** В рамках поставленной задачи был разработан инкрементный оптико-электронный преобразователь линейных перемещений субмикронной точности „Л-200“. В основу работы преобразователя положен эффект модуляции светового

потока по интенсивности оптического излучения, реализуемый двумя голографическими дифракционными решетками, одна из которых перемещается относительно другой [2—4].

Уникальность предложенной конструкции состоит в удвоении периода выходных сигналов преобразователя за счет совмещения двух дифракционных решеток с разным разрешением и специального фотоприемного модуля, способного обеспечить необходимый уровень выходного сигнала.

Принцип действия разработанного преобразователя, упрощенная оптическая схема которого представлена на рис. 1, заключается в следующем: поток оптического излучения, формируемый лазерным диодом 1, коллимируется объективом 2, отражается от зеркала 3 и далее падает по нормали на протяженную подвижную голографическую дифракционную решетку  $G_1$ , на которой дифрагирует на два симметричных относительно нормали пучка  $\pm 1$ -го порядка. Далее пучки лучей первых порядков проходят через вторую, неподвижную, дифракционную решетку  $G_2$ , установленную с зазором 0,05 мм относительно первой, при этом штрихи одной решетки ориентированы параллельно штрихам другой. Контроль установки дифракционных решеток осуществляется по интерференционным полосам, формирующимся в плоскости фоточувствительных поверхностей многоэлементного фотоприемника 4.

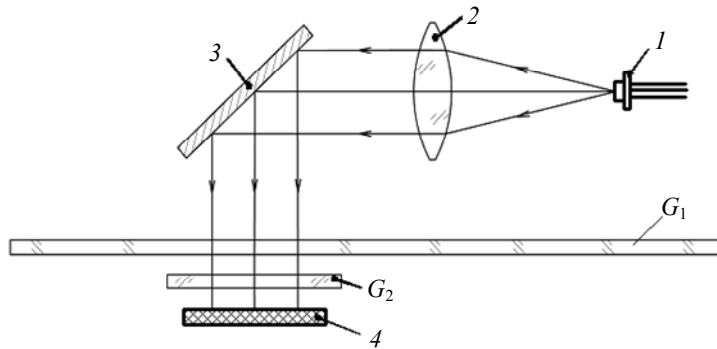


Рис. 1

Первая по ходу лучей решетка  $G_1$  за счет метода изготовления оптимизирована на максимум дифракции  $\pm 1$ -го порядка при перпендикулярном освещении. Вторая по ходу освещения решетка  $G_2$  работает по принципу интерферометрической системы, т.е. расщепляет на нулевой и обратный первый порядки падающие на нее наклонные пучки лучей, расположенные симметрично относительно нормали к поверхности решетки.

При перемещении решетки  $G_1$  в направлении оси  $X$  разность фаз пучков лучей  $\pm 1$ -го порядка изменяется пропорционально смещению решетки, так что смещение на один шаг соответствует изменению разности фаз на  $4\pi$ . В результате интерференции пучков лучей совмещенных порядков интенсивность пучка на выходе дифракционных решеток модулируется при перемещении решетки  $G_1$  по гармоническому закону. При этом один период изменения интенсивности пучка лучей соответствует смещению решетки на  $1/2$  шага.

Голографические дифракционные решетки изготовлены с использованием метода синтеза апертуры линейного интерференционного поля [5] на специальной установке ОАО „СКБ ИС“ (Санкт-Петербург). Период решетки  $G_1$  составляет 2 мкм, решетки  $G_2$  — 1 мкм. Период следования синусоидального сигнала по напряжению на выходе преобразователя равен 1 мкм. Для повышения чувствительности и точности работы преобразователя применялся внешний электронный интерполятор с коэффициентом интерполяции, равным 5; период прямоугольных сигналов на выходе интерполятора составляет 0,05 мкм.

**Экспериментальная установка и методика измерений.** Для контроля точностных характеристик преобразователя линейных перемещений была создана экспериментальная установка, построенная на базе лазерного интерферометра XL-80 фирмы “Renishaw” (Великобритания). Погрешность интерферометра составляет  $\pm 0,01$  мкм, что позволяет его использовать в качестве эталонного средства измерений.

Схема установки приведена на рис. 2, где 1 — неподвижное основание; 2 — приемно-передающий блок лазерного интерферометра XL-80; 3 — блок компенсации атмосферных воздействий; 4 — разделитель лазерного излучения; 5 — отражатель; 6 — подвижная часть; 7 — упор; 8 — шток контролируемого преобразователя; 9 — кронштейн, 10 — контролируемый преобразователь („Л-200“).

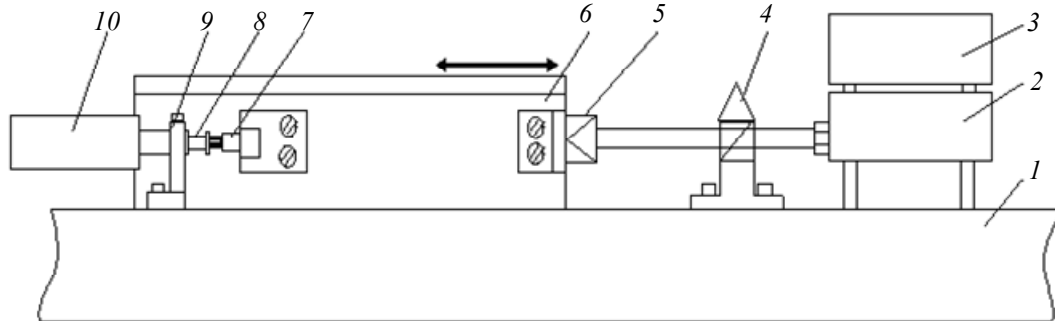


Рис. 2

Для дальнейшей обработки полученных данных использовались электронная плата сопряжения сигнала преобразователя с интерфейсом РС-10/20 и РСМ-20, ноутбук с программным обеспечением лазерного интерферометра XL-80, цифровое устройство ЛИР-510 отображения сигнала контролируемого преобразователя.

Процесс контроля заключается в сравнении результатов измерений величины перемещения штока контролируемым преобразователем и эталонным интерферометрическим датчиком. Шток преобразователя перемещается на заданное расстояние посредством приведения в движение подвижной части установки в прямом и обратном ходе с помощью сервопривода. Между изменениями направления хода подвижной части вводится 5-секундная пауза. Скорость перемещения привода составляет 200 мм/мин. При перемещении штока преобразователя на его выходе формируется сигнал, пропорциональный величине перемещения. Вместе с подвижной частью установки перемещается и закрепленный на ней отражатель лазерного пучка лучей, что приводит к появлению на выходе лазерного интерферометра сигнала, пропорционального величине перемещения отражателя. Сигнал, формируемый на выходе преобразователя, поступает на плату выработки триггерного сигнала, по которому производится фиксация показания лазерного интерферометра.

Для определения точностных характеристик преобразователя было проведено 10 серий измерений в динамическом режиме. Измерения величины перемещения  $L$  производились с интервалом 1 мм.

**Результаты измерений.** Обработка полученных результатов, для прямого и обратного хода, осуществлялась по стандартной методике с расчетом усредненного по 10 сериям измерений значения  $L$  и среднеквадратической погрешности преобразователя ( $\delta L$ ). Плотность распределения величин  $L$  и  $\delta L$ , определенная по критерию Пирсона, подчиняется (по результатам проверки) закону Гаусса и закону равной вероятности [1]. Результаты расчета для нескольких заданных величин перемещения приведены в таблице.

$L$ , мм	$\bar{L}$ , мм	$\delta L \cdot 10^{-8}$ , мм
1,0	0,9998	1,9
2,0	1,9998	2,2
3,0	3,0001	2,0
4,0	4,9999	2,2
5,0	5,0001	2,2

Результаты измерений погрешности  $\Delta L = L - \bar{L}$  исследуемого преобразователя линейных перемещений приведены на рис. 3, а, б соответственно для прямого и обратного хода (на графиках показаны лишь некоторые результаты).

Как видно из графиков, максимальное значение погрешности преобразователя составляет для прямого хода 0,17 мкм, для обратного хода 0,16 мкм; минимальное значение погрешности:  $-0,17$  и  $-0,16$  мкм для прямого и обратного хода соответственно.

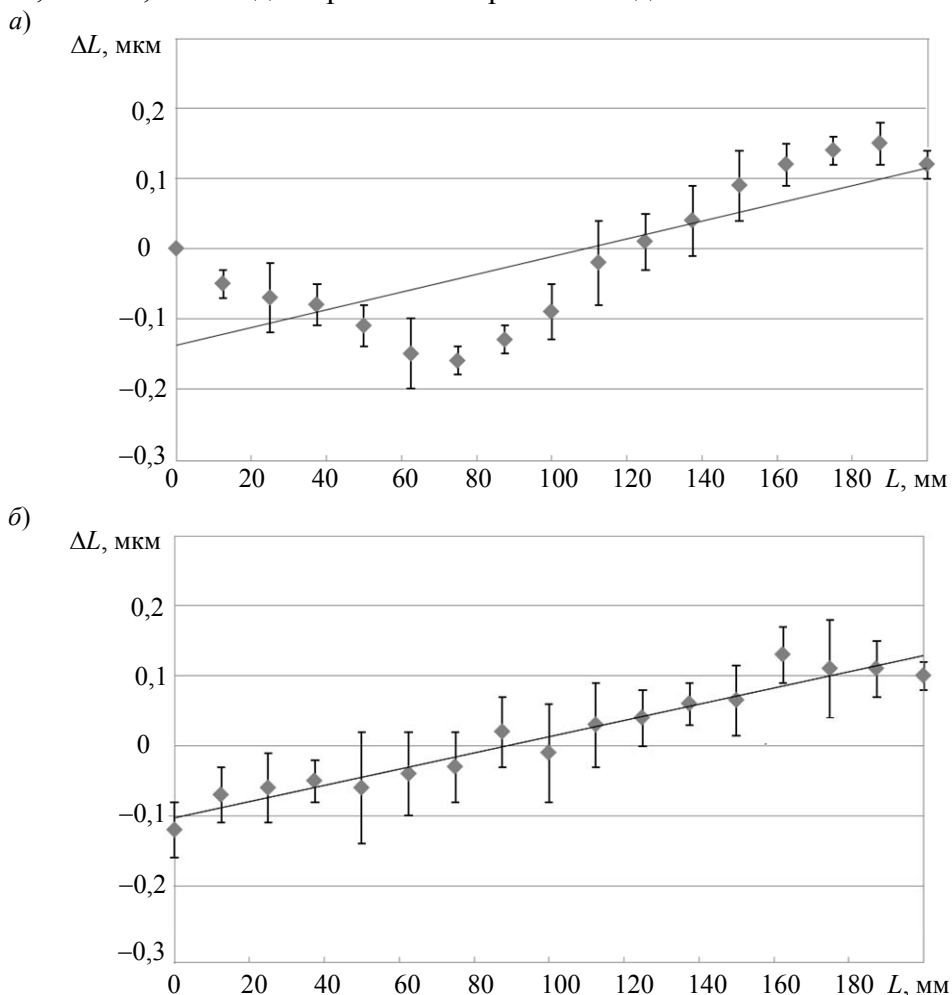


Рис. 3

В ходе измерений температура воздуха составляла  $20,7$  °С, температура материала установки  $20,1$  °С, температурный коэффициент материала установки  $11,7$  мкм/(м·°С), давление  $747,7$  мм рт. ст., влажность  $39,4$  %.

**Заключение.** На основе полученных результатов измерения погрешности разработанного оптико-электронного преобразователя линейных перемещений субмикронной точности „Л-200“ можно сделать вывод о правильности выбора принципа функционирования преобразователя и схемы его построения. Измеренное предельное значение погрешности преобразователя составляет  $\pm 0,17$  мкм, что отвечает современным требованиям к высокоточным операциям на механообрабатывающем оборудовании.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кортаев В. В., Прокофьев А. В., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные преобразователи линейных и угловых перемещений. Ч. I. Оптико-электронные преобразователи линейных перемещений: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012.
2. Турухано Б. Г., Турухано Н. Фотоэлектрические преобразователи линейных перемещений на базе голографических решеток // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 8. С. 69—73.
3. Gordeev S. V., Turukhano B. G. Investigation of the interference field of two spherical waves for holographic recording of precision radial diffraction gratings // Optical & Laser Technology. 1996. Vol. 28, N 4. P. 255—261.

4. Пат. 2197713 РФ. Датчик линейных перемещений / Б. Г. Турухано, В. П. Горелик, С. В. Гордеев // БИ. 2003. № 3. С. 151.
5. Турухано Б. Г., Турухано Н., Вилков Е. А Синтез апертуры цифрового поля // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 2. С. 145—150.

**Сведения об авторах**

**Николай Викторович Смирнов**

— студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: pirate.kolyan@gmail.com

**Александр Валерьевич Прокофьев**

— канд. техн. наук; ОАО „Специальное конструкторское бюро станочных информационно-измерительных систем с опытным производством“ (ОАО „СКБ ИС“), Санкт-Петербург; начальник Бюро метрологии; E-mail: avp79@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
компьютеризации и проектирования  
оптических приборов СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
29.01.13 г.