

станций, однако наиболее перспективными являются одноканальные схемы измерения, в которых осуществляется прямая стыковка электронно-счетного блока с мини-ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Арнаутов, Л. Д. Гик, Е. Н. Калиш, В. П. Коронкевич, И. С. Малышев, Ю. Е. Нестерихин, Ю. Ф. Стусь, Г. Г. Тарасов. Высокоточный лазерный гравиметр.— «Автометрия», 1972, № 5.
2. Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Под ред. чл.-корр. АН СССР Ю. Е. Нестерихина. Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1972.
3. A. Sakuma. Recent developments in the absolute measurement of gravity.— In Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 343, edited by D. N. Langenberg and B. N. Taylor, p. 447. U. S. Government Printing Office, Washington D. C., 1971.
4. Абсолютные определения ускорения силы тяжести в пункте ВНИИМ.— «Труды ВНИИМ», 1958, вып. 32 (92).
5. James E. Faller. A new portable absolute gravity instrument.— "Presented at the International Gravity Commission Meeting", 2—7 September, 1974.
6. П. В. Мелентьев. Приближенные вычисления. М., Физматгиз, 1962.

*Поступила в редакцию 17 февраля 1975 г.*

УДК 531.715.1:621.375.826

**С. Я. ДОБРОВА, А. В. ЗОЛотов, Н. Е. ЛЕВАНДОВСКАЯ,  
В. П. МАЙОРОВ, А. К. МОВШЕВ, А. В. ПОПОВА,  
Е. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН, В. И. ХАЛИМОНОВ**

*(Новосибирск)*

### **ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ФОРУ-1**

В период с 1968 по 1970 г. на Новосибирском приборостроительном заводе им. В. И. Ленина совместно с ИАЭ СО АН СССР была проведена разработка лазерного измерителя перемещений (шифр ФОРУ). В опытных образцах, которые были изготовлены в конце 1970 г., в качестве источника когерентного стабилизированного по частоте излучения использовались ОКГ с системой стабилизации, разработанной НФЗ им. В. И. Ленина, и активными элементами, разработанными и изготовленными ИАЭ СО АН СССР.

В 1973 г. в связи с появлением первых промышленных стабилизированных ОКГ типа ЛГ-32 была проведена доработка и выпущена установочная партия приборов ФОРУ-1.

Интерферометр ФОРУ-1 предназначен для измерения перемещений до 1000 мм путем сравнения с естественной константой — длиной световой волны. Он состоит из двух основных устройств — интерферометра и электронной системы для счета интерференционных полос и обработки результатов измерения. Интерферометр служит для преобразования когерентного излучения ОКГ в периодическую последовательность изменений электрического сигнала, а электронная система — для обработки и вывода результатов измерения на индикаторное и цифropечатающее устройства с учетом предварительного определения длины волны излучения ОКГ. Основные технические характеристики ФОРУ-1: пределы измерения 0÷1000 мм; дискретность отсчета 0,0001 мм; максималь-

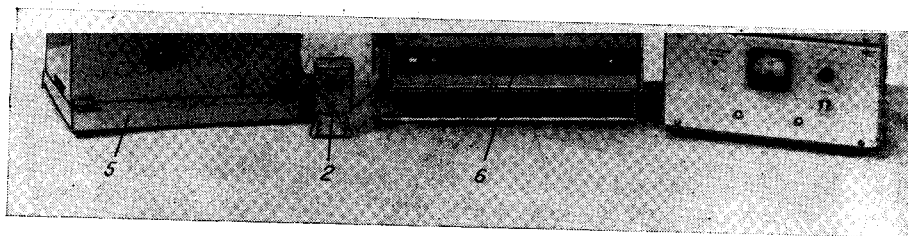


Рис. 1.

ная погрешность измерения на длине 1 м не более 0,0008 мм; скорость перемещения призмы отражателя  $0 \div 25$  мм/с; длина волны излучения ОКГ в вакууме  $63299141 \pm 3$  нм; время готовности прибора к работе не более 0,75 ч; потребляемая мощность не более 400 Вт; общий вес не более 45 кг.

Конструктивно прибор (рис. 1) выполнен с использованием блочных конструкций, с применением интегральных микросхем, печатного монтажа и состоит из интерферометра 1, отражателя 2, прибора ЛГ-32 3, блока питания интерферометра 4, подставки 5 и цифрового пересчетного устройства 6.

Оптическая схема интерферометра (рис. 2) представляет собой двухлучевой интерферометр майкельсоновского типа, подвижное зеркало которого жестко связано с исследуемым объектом. В качестве источника излучения 1 использован промышленный гелий-неоновый стабилизированный по провалу Лэмба оптический квантовый генератор ЛГ-32. Свет от ОКГ, пройдя четвертьволновую пластинку 2, которая превращает линейно-поляризованное излучение лазера в излучение с круговой поляризацией, направляется зеркалом 3 в афокальную трубку 4, предназначенную для уменьшения расходимости и увеличения диаметра светового пучка лазера. Отразившись от зеркальной поверхности призмы 5, свет падает на пластину 6. На светоделительной поверхности пластины 6 происходит деление светового пучка на две части равной интенсивности 1, 2. Световой пучок 1 проходит через пластину 6, защитное стекло 7, призму 8, попадает на светоделительный слой пластины 9 и делится еще раз на две части ( $1'$ ,  $1''$ ). Световой пучок 2, отразившись от поверхности пластины 6, попадает на светоделительный слой пластины 9 и делится на две части ( $2'$ ,  $2''$ ).

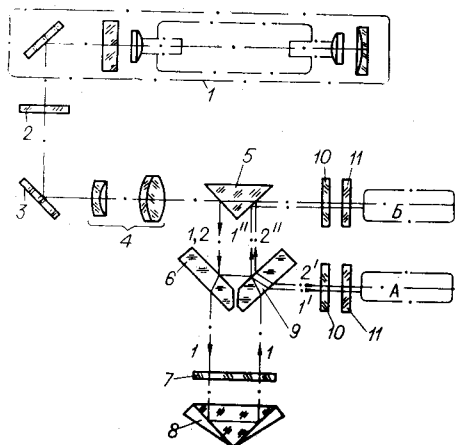


Рис. 2.

На светоделительной поверхности пластины 9 происходит рекомбинация световых пучков 1' и 2' между собой. Результирующие интерференционные картины фиксируются на фотоприемниках А и Б. Разворот поляризаторов 10

позволяет на фотоприемниках А и Б получить сигналы, сдвинутые по фазе на  $90^\circ$ , что необходимо для определения направления перемещения. Рассеивающее стекло *II* предназначено для равномерной засветки фотокатода.

Отражатель 8 жестко связывается с объектом. При смещении отражателя вдоль линии измерения изменяется разность хода интерферирующих пучков и на выходе прибора перед фотоприемниками проходят интерференционные полосы. Число полос *N* связано с измеряемой длиной *L* соотношением

$$L = \frac{N\lambda_{\text{вак}}}{2n_{\text{возд}}},$$

где *L* — измеряемая длина; *N* — число интерференционных полос, зафиксированных фотоприемником;  $\lambda_{\text{вак}}$  — длина волны излучения в вакууме стабилизированного гелий-неонового лазера;  $\lambda_{\text{вак}} = 0,63299141$  мкм;  $n_{\text{возд}}$  — показатель преломления окружающего воздуха.

Блок-схема лазерного измерителя перемещений ФОУ-1, где РС — реверсивный счетчик; Дш — дешифратор; И — интегратор, приведена на рис. 3. Световые потоки, поступающие на фотоприемники, преобразуются в электрические сигналы синусоидальной формы. Смещение подвижного отражателя интерферометра на величину, равную половине длины волны излучения ОКГ, приводит к изменению тока фотоприемника, соответствующему одному периоду синусоидального сигнала. Синусоидальные сигналы с фотоприемников преобразуются дискриминатором в две последовательности прямоугольных импульсов *A* и *B*, сдвинутых по фазе на  $90^\circ$ .

Путем дифференцирования сигналов *A* и *B* и их инверсий  $\bar{A}$  и  $\bar{B}$  учетверитель формирует серию счетных импульсов, частота которых в 4 раза выше, чем у сигналов *A* и *B*. С помощью этих импульсов положение подвижного отражателя определяется с точностью  $\lambda/8$ . Фазовые соотношения между сигналами *A*, *B*,  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  и продифференцированными сигналами *A'*, *B'*,  $\bar{A}'$ ,  $\bar{B}'$  однозначно определяют направление движения подвижного отражателя. Диаграммы формирования счетных им-

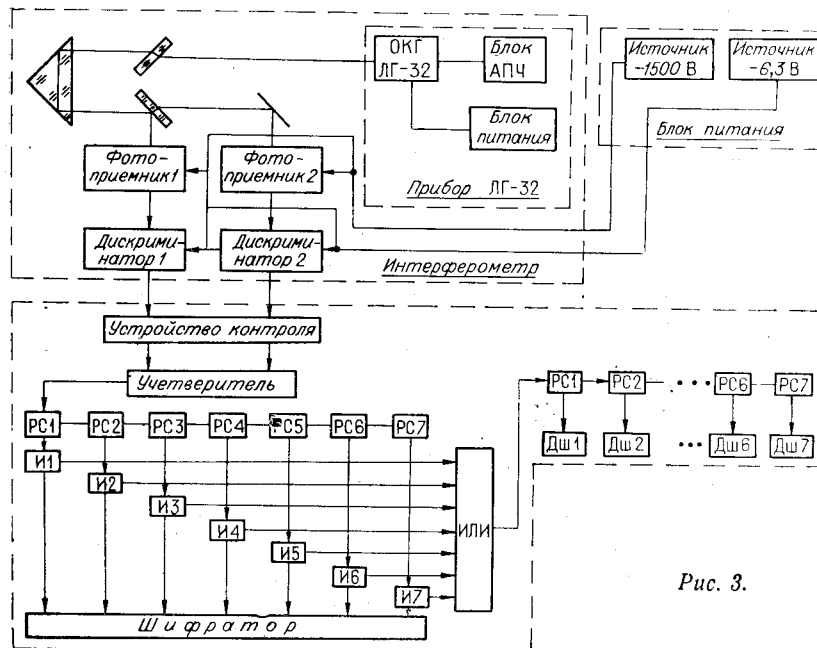


Рис. 3.

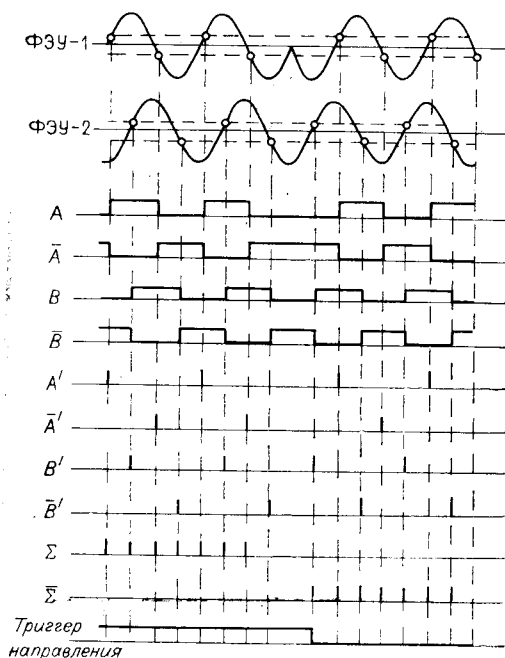


Рис. 4.

пульсов и определения направления перемещения показаны на рис. 4.

Сигнал с учетверителя (см. рис. 3) поступает на вход множительного устройства. Число входных импульсов при этом равно числу интервалов  $\lambda/8$ , укладываемых в отрезке, пройденном отражателем, а частота следования импульсов пропорциональна скорости перемещения отражателя. Так как значение  $\lambda/8$  не кратно выбранной дискретности отсчета, то для индикации результата измерения в миллиметрах число импульсов умножается на некоторую известную для данных внешних условий константу. Значение этой константы вводится вручную оператором в зависимости от давления, температуры и влажности по таблице поправок преднабором шифратора.

Функциональное множительное устройство состоит из семи идентичных десятичных разрядов, сборки ИЛИ, объединяющей выходы десятичных разрядов, и устройства управления. Каждый десятичный разряд умножителя включает в себя один декадный реверсивный счетчик-делитель в коде 8421 и один интегратор, работающий в двоично-десятичном коде 5211. Выходы десятичных разрядов объединяются семивходовой сборкой ИЛИ-НЕ, с выхода которой импульсы поступают в регистрирующий реверсивный счетчик.

Число импульсов, поступивших из множительного устройства в регистрирующий счетчик, соответствует величине перемещения в миллиметрах. Результат измерения индуцируется на табло, и в двоично-десятичном коде дополнительно выводится на внешний разъем блока для подключения цифроречевающего устройства.

С целью уменьшения влияния дрейфа «0» (изменение величины опорного плеча интерферометра в функции изменения температуры) и механических вибраций на результаты измерений корпус и подставка интерферометра представляют собой массивные отливки из перлитного чугуна с малым коэффициентом линейного расширения.

Для улучшения помехозащищенности и предотвращения сбоев в процессе измерения в последние образцы приборов введено устройство защиты от промышленных помех. Испытания показали высокую надежность этих образцов.

Анализ работы приборов установочной партии, находящихся в эксплуатации в различных отраслях народного хозяйства, показывает их общую работоспособность и позволяет выявить причины отказов.

1. Нарушение работоспособности ОКГ ЛГ-32. Прибор ЛГ-32 является первым отечественным промышленным малогабаритным стабилизированным лазером. Ряд конструктивных недоработок и недостаточно отработанная технология изготовления приводят к разъюстировке резонатора ОКГ и сбоям работы блока АПЧ.

2. Разъюстировка оптической схемы интерферометров. Установленными причинами являются:

разъюстировка резонатора ОКГ, приводящая к пространственному смещению выходного луча, а следовательно, к разъюстировке интерферометра;

действие внутренних остаточных механических напряжений корпуса и узлов интерферометра, созданных в процессе изготовления и сборки;

неквалифицированная установка интерферометра потребителем, вызывающая недопустимые перекосы основания интерферометра.

Метрологические испытания лазерного интерферометра ФОУ-1 № 73001 из установочной партии проводились на продольно-делительной машине ПДМ-1000. На подвижной каретке машины с соблюдением принципа Аббе были установлены рабочий эталон длины — инваровый метр № 68902, изготовленный фирмой «Бамберг», и отражатель. Для наведения на штрих рабочего эталона использовался фотоэлектрический микроскоп ФЭМ-2, погрешность наведения которого не превышает 0,1 мкм. Введение поправок в шифратор на отклонение внешних условий измерений от нормальных ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $P=101\cdot 10^3$  Па,  $l=10$  мм рт. ст.) производилось вручную по таблицам поправок из паспорта на прибор. Было проведено по 5 циклов измерения рабочего эталона-метра через 100 мм. Из графика рис. 5 видно, что отклонения показаний ФОУ-1 от приведенного размера рабочего эталона-метра во всех точках не превышают указанной выше величины погрешности (0,8 мкм) лазерного интерферометра ФОУ-1. Исключения составляют точки 600, 700 и 800 мм. Для этих точек были произведены дополнительные многократные измерения. Все они показывали результаты, близкие по значениям (сходимость показаний  $\leq 0,3$  мкм). Учитывая это, а также то, что интерференционные измерения свободны

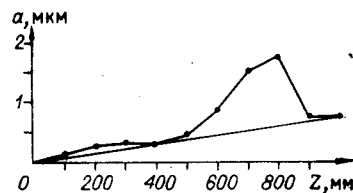


Рис. 5.

от местных погрешностей, следует считать вероятным наличие ошибочных данных в аттестате рабочего эталона в указанных точках.

Можно отметить также следующую характерную особенность графика (рис. 5). Если соединить прямой линией начальную и конечную точки графика, то все точки графика, за исключением вышеуказанных — 600, 700 и 800 мм, практически совпадут с этой прямой. Из этого можно сделать предположение, что отклонения показаний ФОУ-1 от приведенных значений рабочего эталона являются линейной функцией погрешности определения значений параметров внешних условий измерения (температуры, давления, влажности) и температуры самого эталона. Действительно, если поправка на температуру эталона введена с погрешностью в  $0,05^{\circ}$ , то погрешность в определении действительного значения полного размера эталона-метра составит 0,6 мкм, а погрешности определения промежуточных делений будут линейно-зависимы от используемой длины шкалы эталона.

Дополнительно было проведено 10 циклов измерения рабочего эталона-метра от 0 до 1000 мм. Результаты измерений сведены в таблицу.

По результатам измерений вычисляем: среднее значение отклонения  $a = -0,05$  мкм, дисперсию  $\bar{D} = \frac{1}{n-1} \sum \delta^2 = \frac{0,28}{9} = 0,03$  мкм<sup>2</sup>;

среднеквадратичное отклонение  $S = \sqrt{\bar{D}} = \sqrt{0,03} = 0,17$  мкм.

Как видно из таблицы, максимальное отклонение показаний прибора ФОУ-1 от значения рабочего эталона-метра по аттестату (приведенного к температуре измерения) не превышает 0,23 мкм при оценке среднеквадратического отклонения  $S=0,17$  мкм. Такие отклонения можно считать незначительными, так как измерения проводились в обычных условиях без термостатирования в процессе измерения.

| Цикл измерения | Проверяемые точки | Показания ФОУ-1, мм | Приведенный размер рабочего эталона, мм | Отклонения показаний ФОУ-1 от приведенного размера эталона, мкм | Отклонение от среднего ( $\delta$ ), мкм | $\delta^2$ , мкм <sup>2</sup> |
|----------------|-------------------|---------------------|---|---|--|-------------------------------|
| 1              | 0                 | 000.0001            | 1000.01524                              | +0,16   | +0,21                                    | 0,04                          |
|                | 1000              | 1000.0155           |   |   |  |                               |
| 2              | 0                 | 000.0000            | 1000.01567                              | +0,23   | +0,28                                    | 0,08                          |
|                | 1000              | 1000.0159           |   |   |  |                               |
| 3              | 0                 | 000.0000            | 1000.0164                               | -0,10   | -0,05                                    | 0,002                         |
|                | 1000              | 1000.0163           |   |   |  |                               |
| 4              | 0                 | 000.0001            | 1000.0163                               | -0,20   | -0,15                                    | 0,02                          |
|                | 1000              | 1000.0162           |   |   |  |                               |
| 5              | 0                 | -000.0001           | 1000.0167                               | -0,16   | -0,11                                    | 0,01                          |
|                | 1000              | 1000.0185           |   |   |  |                               |
| 6              | 0                 | 000.0001            | 1000.0164                               | -0,20   | -0,15                                    | 0,02                          |
|                | 1000              | 1000.0163           |   |   |  |                               |
| 7              | 0                 | 000.0001            | 1000.0165                               | -0,20   | -0,15                                    | 0,02                          |
|                | 1000              | 1000.0164           |   |   |  |                               |
| 8              | 0                 | 000.0000            | 1000.01643                              | -0,03   | +0,02                                    | 0,0004                        |
|                | 1000              | 1000.0164           |   |   |  |                               |
| 9              | 0                 | -000.0001           | 1000.01608                              | +0,22   | +0,27                                    | 0,07                          |
|                | 1000              | 1000.0162           |   |   |  |                               |
| 10             | 0                 | 000.0000            | 1000.0164,9                             | -0,19   | -0,14                                    | 0,02                          |
|                | 1000              | 1000.0163           |   |   |  |                               |

Таким образом, метрологические испытания ФОУ-1 показали, что прибор может применяться в качестве отсчетного устройства высокой точности в координатно-измерительных машинах, инструментальных микроскопах, прецизионных станках, а также как датчик линейных перемещений для измерения физических величин, выражаемых через длину.

Поступила в редакцию 7 января 1975 г.

УДК 621.373.826:621.317

**С. Н. АТУТОВ, В. П. БЕССМЕЛЬЦЕВ, В. Н. БУРНАШОВ,  
В. В. ВОРОБЬЕВ, В. П. КОРОНКЕВИЧ, А. И. ЛОХМАТОВ,  
В. С. СОБОЛЕВ, В. А. ШАТАЛОВ**

(Новосибирск)

### **ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРА**

Высокая стабильность излучения лазера позволяет использовать его длину волны как образцовую меру расстояния при создании интерферометров для измерения линейных и угловых перемещений [1]. По нашему мнению, в ближайшие годы лазерные измерители перемещений заменят все другие средства измерения длин не только в учреждениях метрологической службы, но и непосредственно в промышленности, особенно в таких ее отраслях, как станкостроение и т. п.