

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМЕНИ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА

*Библио.*

ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНЫХ  
И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 199 (259)



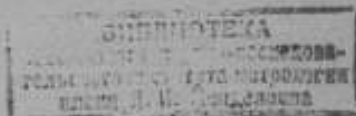
110048



11

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

м 16657 а



# ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 199 (259)

Под редакцией *Л. К. Каяка*



«ЭНЕРГИЯ»  
ЛЕНИНГРАД 1976

В настоящем сборнике помещены статьи, содержащие результаты исследований, выполненных во ВНИИМ и других метрологических институтах в области линейных и угловых измерений за годы 9-й пятилетки.

Исследования направлены на совершенствование системы эталонов и образцовых средств измерений длины и углов с целью повышения уровня точности и обеспечения правильности измерений, что является необходимым условием технического прогресса и, в первую очередь, в станкостроении, машиностроении и приборостроении. Именно в этих отраслях промышленности требования к точности измерения геометрических размеров непрерывно ужесточаются, так как от точности зависит не только степень взаимозаменяемости в производстве, но и качество и надежность изделий, машин, станков, приборов.

В ряде статей сборника приводятся результаты исследований действующих государственных первичных и вторичных эталонов единиц и намечаются перспективы их совершенствования. В сборнике также рассматриваются новые методы и средства линейных и угловых высокоточных измерений и в частности измерительные средства, в которых применяются излучения лазеров.

За последние годы были разработаны и утверждены новые нормативные документы на средства измерений длины и углов ГОСТ 8.020-75, ГОСТ 8.016-75, ГОСТ 8.166-75, ГОСТ 8.050-73 и др., которые имеют важное значение для метрологического обеспечения области линейных и угловых измерений.

В некоторых статьях рассматриваются новые виды линейных измерений, например, измерения толщины пленок и покрытий, параметров геометрической формы, измерения в динамическом режиме и т. п. В сборнике освещаются также вопросы метрологического обеспечения области линейных и угловых измерений и создания необходимых образцовых средств измерений.

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов, работающих в промышленности и научных лабораториях.



Ю. П. Ефремов, Н. А. Калинин,  
Л. К. Каяк

ВНИИМ

### СИСТЕМА ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ

Система эталонов в области линейных измерений включает в себя государственный первичный эталон метра, утвержденный Госстандартом СССР в 1968 г. [1], и большое число вторичных эталонов (эталонных копий, эталонов сравнения и рабочих эталонов), с помощью которых размер единицы длины, воспроизводимый первичным эталоном, передается образцовым средствам измерений длины. Эта система согласованных между собой эталонов единицы длины обеспечивает единообразие средств измерений длины, единство и правильность линейных измерений в стране.

Государственный эталон и эталоны-копии метра хранятся и применяются во ВНИИМ\*. Погрешность воспроизведения длины волны первичного эталонного излучения криптона-86 составляет  $3 \pm 5 \cdot 10^{-9}$  [2-4].

Эталонами-копиями являются: платино-иридиевые штриховые меры № 11 и № 28 (копии международного прототипа метра), платино-иридиевая штриховая мера ВИЛ-100 (M20°) с новой шкалой штрихов высокого качества, нанесенной в 1970 г., комплекс из двух интерференционных установок: 1) для измерения длины плоскопараллельных концевых мер до 100 мм (с интерферометром типа Кестерса) и 2) для измерения длины плоскопараллельных концевых мер до 1000 мм и геодезических кварцевых жезлов до 1200 мм (с интерферометром типа ВНИИМ) [5].

Погрешности эталонов-копий оцениваются средним квадратическим отклонением результата измерений их длины на государственном первичном эталоне метра и неисключенными систематическими погрешностями:  $S_0 = (0,01 + 0,02 L)$  мкм, где  $L$  — числовое значение длины меры в метрах — для штриховых мер длины, или погрешностью воспроизведения длин волн вторичных эталонных излучений криптона-86, ртути-198 и кадмия-114 (соответственно  $2 \cdot 10^{-8}$ ,  $5 \cdot 10^{-8}$  и  $7 \cdot 10^{-8}$ ) — для интерференционных установок.

Рабочими эталонами служат штриховые меры длиной от 0,1 до 4 м, концевые меры длиной от 0,1 до 1 м, а также интерференционные установки, с помощью которых производится проверка образцовых концевых и штриховых мер длины 1-го разряда. Рабочие эталоны хранятся и применяются в метрологических институтах, а также в центрах метрологии и стандартизации и являются исходными мерами длины этих органов метрологической службы. ВНИИМ регулярно проводит сличения рабочих эталонов с эталонами-копиями.

\* Результаты исследования первичного эталона метра приводятся в статье М. Л. Бржезинского и Г. В. Симахиной на стр. 7—11.

Среднее квадратическое отклонение результата измерений длины рабочих эталонов — штриховых мер не превышает  $(0,02 + 0,04 L)$  мкм, рабочих эталонов — концевых мер —  $(0,01 + 0,05 L)$  мкм.

Результаты сличений, выполненных за последние годы, свидетельствуют об удовлетворительном состоянии рабочих эталонов.

Сличения рабочих эталонов интерференционных установок проводятся с помощью эталонов сравнения по определенной программе [6]. С 1972 г. в этих сличениях, кроме метрологических институтов, принимал участие Волжско-Вятский центр метрологии и стандартизации (г. Горький), которому предоставлено право поверки образцовых концевых мер 1-го разряда длиной до 100 мм. Проводились также и международные сличения эталонов длины [7].

Система образцовых средств измерений длины включает в себя три ряда образцовых штриховых мер длины и пять разрядов образцовых плоскопараллельных коцевых мер длины, а также несколько типов образцовых приборов для измерений длины поверяемых мер прямым методом или методом сличений.

В новой поверочной схеме (ГОСТ 8.020—75), по сравнению со старой, предусмотрено повышение точности образцовых мер длины 1-го и 2-го разрядов в 2—2,5 раза.

С этой целью проведен ряд усовершенствований методики измерений, разработаны новые интерференционные приборы, улучшено качество эталонных и образцовых мер длины. Для изготовления точных штриховых мер длины создан высокостабильный материал и высокоточные делительные машины [8].

В последние годы появилась необходимость в образцовых средствах для поверки приборов, применяемых для измерения внутренних размеров цилиндрических колец, толщиномеров, приборов для контроля правильности геометрической формы поверхностей, приборов автоматического контроля размеров, в том числе приборов, работающих в динамическом режиме и др. Сейчас в поверочной схеме предусмотрены новые виды эталонных и образцовых средств измерения длины, например, для измерения внутренних диаметров, малых и больших длин.

Необходимость столь широкой системы эталонов и образцовых средств измерений длины объясняется большим количеством и разнообразием применяемых средств измерений, а также высоким уровнем точности линейных измерений в промышленности.

Систему эталонов единицы длины можно рассматривать в более широком аспекте, включив в нее также и специальные государственные эталоны единицы длины, обеспечивающие единство измерений в спектроскопии, области измерений параметров шероховатости поверхности и сложных геометрических форм, больших расстояний, амплитуд вибраций и другие, которые должны быть согласованы с первичным эталоном метра. В настоящей статье эти специальные эталоны не рассматриваются.

Возрастающие требования науки и ведущих отраслей промышленности к точности линейных измерений обуславливают дальнейшее повышение точности образцовых и эталонных мер длины. Пределы допускаемых погрешностей измерения длины штриховых и концевых мер и линейных перемещений должны быть снижены до 0,1 мкм на метр для образцовых мер 1-го разряда (т. е. до современного уровня точности рабочих эталонов), до 0,03 мкм на метр — для рабочих эталонов и до 0,01 мкм на метр — для эталонных копий.

Требование еще более высокой точности измерений длины существующих мер не будет оправдано вследствие неопределенности их размеров, обусловленной качеством штрихов или измерительных поверхностей мер, а также из-за нестабильности материала во времени. Действительную температуру меры необходимо будет определять с погрешностью менее  $0,001^\circ\text{C}$ , показатель преломления воздуха при интерференционных измерениях — с погрешностью менее  $1 \cdot 10^{-8}$ , что представляет значительные технические трудности.

Новые эталонные средства измерений длины, по-видимому, должны содержать специальные баротермокамеры с автоматическим регулированием условий измерений для размещения в них интерференционных установок и измеряемых мер длины. Необходимы также высокоточные и надежные методы и средства автоматизации процесса измерений длины.

Как показали исследования эталонного интерференционного компаратора, запас точности у первичного эталона сейчас довольно мал. Для метрологического обеспечения линейных измерений на прогнозируемом уровне точности погрешность воспроизведения первичного эталона единицы длины должна быть снижена до  $10^{-10}$  и менее, а погрешность передачи размера единицы длины вторичным эталонам до  $(2+5) \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-9}$ . Достижения квантовой электроники в технике позволяют уже сейчас говорить о возможности создания нового первичного эталона метра, на два-три порядка более точного, чем существующий. Основным условием, которым должен удовлетворять новый эталон: постоянство размера воспроизводимой единицы во времени и преемственность — сохранение размера единицы в пределах точности воспроизведения старого эталона — удовлетворяют излучения стабилизированных газовых лазеров. Погрешность воспроизведения длины волны их излучения составляет  $10^{-11} - 10^{-14}$  [9], а значение длины волны может быть сравнено с длиной волны первичного эталонного излучения криптона-86 с погрешностью до  $10^{-9}$ .

В 1973 г. 5-я сессия Консультативного комитета по определению метра (ККОМ) приняла рекомендацию о применении гелий-неоновых лазеров, стабилизированных по насыщенному поглощению в метане ( $\lambda = 3,39$  мкм) и воде ( $\lambda = 0,633$  мкм), в качестве эталонных источников излучений. Рекомендованы следующие значения длины волны в вакууме:

Линия	Длина волны
метана, $P$ (7), полоса $v_2$ ;	$3392231, 40 \cdot 10^{-12}$ м;
вода-127, $R$ (127), полоса 11-5;	$632991, 399 \cdot 10^{-12}$ м.
составляющая $I$ .	

Эти значения установлены с относительной погрешностью порядка  $\pm 4 \cdot 10^{-9}$ , т. к. они определяются относительной погрешностью воспроизведения длины волны оранжевой линии криптона-86.

Значения длины волны других составляющих линии поглощения вода-127 или вода-129 легко определить, так как известны разности частот между ними. Например, составляющая  $v$  вода-129 имеет длину волны короче длины волны составляющей  $i$  вода-127 на  $1,32116 \cdot 10^{-12}$  м, т. е. ее длина волны равна  $632\,990,078 \cdot 10^{-12}$  м.

Для реализации имеющихся возможностей повышения точности эталонов необходимо прежде всего изменить само определение единицы длины 1960 г.

На упомянутой выше 5-й сессии ККОМ рассматривались два варианта определений метра: 1) числом длин волны в вакууме одного из излучений гелий-неоновых лазеров; 2) расстоянием, на которое распространяется свет в вакууме за определенное время (примерно  $\frac{1}{3} \cdot 10^{-8}$  с).

Второй вариант определения метра основывается на исследованиях НБС (США) и некоторых других лабораторий, в результате которых было установлено значение скорости света в вакууме:

$$c = 299792458 \text{ м/с,}$$

которое было утверждено в 1975 г. XV Генеральной конференцией по мерам и весам с погрешностью  $\pm 4 \cdot 10^{-9}$ . Скорость света была получена путем измерений длины волны  $3,39$  мкм гелий-неонового лазера, стабилизированного по одной из составляющих линий поглощения в метане относительно длины волны первичного эталонного излучения  $0,606$  мкм криптона-86, и измерения частоты этого же излучения относительно цезиевого эталона частоты.

По мнению авторов определение метра числом длин волны лазерного излучения (особенно в видимой области спектра) предпочтительнее, так как

в этом случае сохранится преемственность не только размера единицы длины, но и наиболее точных методов и средств измерений длины до  $1 \div 10$  м. Единица длины останется основной, и не потребуются принципиальных изменений систем единиц измерений физических величин (в том числе и СИ). Не потребуются и коренной перестройки существующей системы эталонов единицы длины.

Определение единицы длины через скорость распространения света имеет некоторые преимущества лишь при измерении больших длин (расстояний). Доля этих измерений в геодезии, астрономии, космонавтике постоянно растет, но все еще составляет лишь небольшую часть общего объема линейных измерений.

Газовые лазеры позволяют решить проблему создания единого эталона единицы длины и времени, при условии, если метр определять числом длин волны одного из лазерных излучений, а секунду — числом периодов колебаний того же излучения.

Новое определение единицы длины является делом ближайшего будущего, новое определение единицы времени — дело более отдаленного будущего: следует добиться погрешности воспроизведения частот излучения лазеров значительно меньшей, чем погрешность существующего эталона ( $10^{-12}$ ), а главное — разработать методы и средства сравнения частот видимой области спектра с радиочастотами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бржезинский М. Л., Қолымагина Т. В., Марголина Г. М., Симанина Г. В. Эталонная интерференционная установка для воспроизведения единицы длины и результаты ее исследования. — Труды метрологических институтов СССР, вып. 101(151), 1968, М.—Л., с. 5—18, с ил.
2. Батарчукова Н. Р., Глазман Ц. И., Птицына Е. А. Эталоны длины волны и средства их воспроизведения. — «Измерительная техника», 1972, № 8, с. 13.
3. Comité consultatif pour la définition du mètre, 5 session, Paris, BIPM, 1973.
4. Terrien J. Étalons de longueur d'onde, étalons optiques de fréquence et la vitesse de la lumière. "Nouv. Rev. Optique", 1973, t. 4, N 4.
5. Ефремов Ю. П. Исследование интерференционной установки ВНИИМ для измерения длины образцовых плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда и геодезических жезлов длиной до 1200 мм. — Труды метрологических институтов СССР, вып. 101(151), 1968, с. 28—36, с ил.
6. Алексеева Е. П., Шошина О. Ю. Сравнение интерференционных установок институтов Комитета. — Труды институтов Комитета стандартов, вы. 47(107), 1961, с. 72—78.
7. Вербанов В., Секереш Я., Шенке В., Выжиковская З., Латышева Е. И., Бажантова М. Сравнения концевых и штриховых мер длины до 1 м на эталонных установках стран-членов СЭВ. — «Измерительная техника», 1974, № 6, с. 12—13.
8. Никитин Б. Д., Бояров А. И., Залкина Л. И. Высокоточная делительная машина. — «Станки и инструмент», 1970, № 4, с. 40—44 с ил.
9. Багаев С. Н. Исследование воспроизводимости частоты газовых лазеров. Автореф. дис. на соискание учен. степ. канд. техн. наук, Новосибирск, 1974, 30 с. (СО АН СССР).

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

## ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН МЕТРА

Для практической реализации нового определения эталона длины — метра через длину световой волны излучения оранжевой линии изотопа криптона 86 была создана эталонная установка, состоящая из комплекса измерительных средств; источника излучения первичной и вторичной длины волны, спектроинтерферометра для исследования источников излучения, интерференционного компаратора с фотоэлектрическим микроскопом и рефрактометром, прецизионной термометрической аппаратуры и других вспомогательных приборов. Передача размера единицы длины — метра или его долей вторичным эталонам — штриховым или концевым мерам осуществляется при помощи двухлучевого интерферометра, методом совпадения дробных частей порядка интерференции определяется разность хода, отвечающая длине измеряемого интервала меры.

Автоматических средств для регистрации результатов измерения и учета влияния внешних факторов на эталонной установке не предусматривалось; по аналогичному принципу созданы эталонные интерференционные установки в зарубежных метрологических институтах.

Точность эталона единицы длины в новом определении обусловлена точностью и стабильностью воспроизведения первичной длины волны, а точность передачи размера единицы вторичным эталонам будет определяться погрешностями всего комплекса измерительных средств эталонной установки, а именно: погрешностью отсчета дробных долей порядка интерференции, погрешностью измерения температуры меры и воздуха и влиянием других внешних факторов, которые будут порождать случайные погрешности и вносить в результат измерения систематические ошибки, трудно поддающиеся учету и исключению.

Применяемая кинематическая система интерференционного компаратора, качество его оптики, методика измерения также могут вносить систематические погрешности. Поэтому повышение точности воспроизведения единицы длины и передачи ее значения вторичным эталонам будет зависеть не только от точности воспроизведения длины световой волны, но в большей степени от повышения точности всего комплекса измерительных средств эталонной установки.

В результате исследований всего комплекса измерительных средств эталонной установки и анализа отдельных составляющих погрешностей определена суммарная погрешность при воспроизведении вторичных эталонов — штриховых мер [1, 2]. В этих расчетах погрешность воспроизведения первичной длины волны криптона 86 принималась равной  $1 \cdot 10^{-6}$ , погрешность определения показателя преломления воздуха  $3 \cdot 10^{-6}$  и погрешность измерения температуры  $3 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}$ . Суммарное значение погрешностей, полученное на основании анализа отдельных составляющих всего комплекса измерительных средств, хорошо согласовывалось с опытными данными.

В результате этих теоретических расчетов и опытных данных среднее квадратическое отклонение воспроизведения вторичных эталонов — штриховых мер длины оценивалось величиной порядка  $3-5 \cdot 10^{-3}$ .

## Исследования и усовершенствование эталонной установки

Работы оптической лаборатории ВНИИМ [2] и некоторых зарубежных метрологических институтов по исследованию и усовершенствованию источников первичного излучения криптона 86 показали, что погрешность воспроизведения длины волны, при строгой соблюдении условий спецификации, не превышает величины порядка  $4 \cdot 10^{-9}$ .



Так как длина волны в воздушной среде устанавливается по показателю преломления, то необходимо определять с высокой точностью значение этого параметра. Многочисленными опытами установлено, что измерение с помощью интерференционного рефрактометра показателя преломления с погрешностью  $1-2 \cdot 10^{-8}$  в изменяющейся воздушной среде весьма затруднительно. В то же время определение показателя преломления воздуха с погрешностью в одну единицу восьмого знака будет в такой же степени влиять на результат измерения длины меры [3].

С помощью фотоэлектрического микроскопа при хорошем качестве штриха можно установить на центр штриха с погрешностью порядка  $3-4 \cdot 10^{-3}$  мкм. Высокая чувствительность фотоэлектрического микроскопа дает возможность использовать шкалу миллиамперметра электронного блока для отсчета дробных долей порядка интерференции до 0,01 интерференционной полосы. Однако при больших разностях хода и слабой интенсивности источника света увеличивается погрешность фиксирования полос интерференционной картины и точность отсчета долей полосы заметно снижается. С целью повышения точности и надежности отсчета долей полосы разработан фотоэлектрический метод [4, 5]. Его применение на эталонной установке позволяет повысить точность отсчета в тех случаях, когда видимость интерференционной картины слабая и, кроме того, дает возможность более надежно производить измерения при больших разностях хода.

Нельзя не отметить, что слабая интенсивность и недостаточная когерентность источника света — лампы с изотопом криптона 86 является также препятствием для повышения точности воспроизведения единицы длины; измерение метра приходится производить в два приема по 500 мм, а это не может не вносить дополнительных погрешностей.

Точность измерения температуры, вернее сказать установление фактического значения температуры меры в момент ее аттестации, также будет вносить свою погрешность. Ошибка в определении температуры метровой меры в  $0,001^\circ\text{C}$  может привести к погрешности определения длины меры до 0,01 мкм.

В процессе практического применения эталонной установки были выявлены некоторые конструктивные недостатки в узлах механизмов тонкой подачи каретки интерферометра и механизма коррекционной системы. После длительной эксплуатации эталонной установки потребовался ремонт и некоторое усовершенствование пульта управления и наблюдения. Работы по ремонту были выполнены на заводе «Эталон».

Как следует из приведенного анализа, погрешность передачи размера единицы длины от источника первичного излучения вторичным эталонам будет определяться суммарным значением отдельных составляющих погрешностей всего комплекса измерительных средств эталонной установки.

Для повышения точности эталона за счет снижения погрешностей при передаче размера единицы длины вторичным эталонам проводились повторные исследования и аттестация измерительных средств, входящих в состав эталонной установки. В результате исследования и усовершенствования источника излучения точность воспроизведения первичной длины волны криптона 86 была доведена до  $4 \cdot 10^{-8}$ . В результате применения фотоэлектрического метода для отсчета дробных долей интерференционной полосы повысилась точность до 0,01 полосы.

С повышением точности определения показателя преломления воздуха (до  $2 \cdot 10^{-8}$ ) уменьшалась погрешность при пересчете значения длины волны от вакуума к воздуху.

В результате повышения точности аттестации термометрической аппаратуры снизилась до  $0,002^\circ\text{C}$  погрешность определения температуры меры в процессе ее измерения.

Некоторые систематические погрешности были уменьшены в результате конструктивных усовершенствований компаратора и методики его юстировки.

Приведем результаты оценки точности передачи размера единицы длины вторичным эталонам после усовершенствования интерференционного компаратора и уточнения отдельных погрешностей комплекса измерительных



средств. Среднее квадратическое отклонение результата измерения  $\sigma_x$ , полученное на основании многих серий измерений штриховых эталонов длины, находится в пределах 0,02—0,03 мкм.

Погрешность среднего квадратического отклонения результата измерения  $\sigma(\sigma_x)$  для десяти независимых измерений найдем из уравнения

$$\sigma(\sigma_x) = 0,24 \sigma_x.$$

Для двух значений  $\sigma_x$  получим

$$\sigma\left(\sigma_x^I\right) = 0,24 \cdot 0,02 = 0,005 \text{ мкм};$$

$$\sigma\left(\sigma_x^{II}\right) = 0,24 \cdot 0,03 = 0,007 \text{ мкм}.$$

Это подтверждает достаточную надежность оценки среднего квадратического отклонения результата измерения вторичных эталонов.

После исследования и уточнения отдельных составляющих погрешностей эталонной установки были приняты следующие значения неисключенных систематических остаточных погрешностей:

- 1) за счет воспроизведения первичной длины волны  $4 \cdot 10^{-5}$  мкм;
- 2) за счет определения показателя преломления воздуха  $2 \cdot 10^{-9}$  мкм;
- 3) за счет неточности измерения температуры меры 0,016 мкм;
- 4) за счет поправки на размеры коллиматорной щели  $2 \cdot 10^{-9}$  мкм.

Найдем сумму неисключенных систематических погрешностей. Для доверительной вероятности  $p=0,95$

$$\theta_{\Sigma} = 1,2 \sqrt{0,004^2 + 0,02^2 + 0,016^2 + 0,002^2} = 0,03 \text{ мкм}.$$

Как видно, наличие неисключенных систематических погрешностей заметно расширяет доверительные границы погрешности измерения вторичных эталонов. Определив сумму неисключенных систематических погрешностей, найдем среднее квадратическое отклонение суммарной погрешности:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_x^2 + \frac{1}{3} \sum \theta_i^2}.$$

Для наших значений  $\sigma_x = 0,02 \div 0,03$ ;  $\sigma_{\Sigma} = 0,03 \div 0,04$  мкм.

На основании анализа можно сделать вывод, что снижение погрешностей измерительных средств эталонной установки даже до практически возможных пределов не привело к существенному повышению точности аттестации вторичных эталонов — штриховых мер длины.

Удовлетворяет ли современным требованиям промышленности эталонная установка по точности воспроизведения единицы длины и передаче ее размера вторичным эталонам и образцовым мерам высшего разряда? Ответ на этот вопрос можно получить на основании запросов промышленности.

С момента утверждения государственного эталона установка служит для воспроизведения единицы длины и передачи ее размера вторичным эталонам — штриховым и коцевым мерам длины.

На эталонной установке в длинах световых волн криптона 86 аттестованы: платино-ирридиевые эталоны-копии — метра № 11 и бывший государственный эталон метра № 28; штриховая метровая мера № 6, которая использовалась в качестве рабочего эталона при сличении образцовых установок лаборатории ВНИИМ и стран-членов СЭВ.

Развитие и внедрение прецизионного станкостроения и приборостроения обусловило необходимость производства штриховых мер длины высоких классов точности. Во ВНИИМ разработан стандарт на штриховые меры (ГОСТ № 12069—66) и новые инструкции на методы поверки точных штриховых мер длины. Экспериментальным научно-исследовательским институтом металлорежущих станков (ЭНИМС) впервые в СССР освоено производство

штриховых мер классов 0 и 1. Исследования во ВНИИМ показали, что штриховые меры отечественного производства полностью соответствуют требованиям ГОСТ 12069—66, а по точности делений и качеству штрихов превосходят аналогичные меры известных зарубежных фирм.

Согласно ГОСТ, допустимое предельное отклонение между любыми двумя штрихами принято  $\Delta = (0,5 + 0,5 L)$  мкм — для класса 0;  $\Delta = (1 + 1 L)$  мкм — для класса 1, а погрешность аттестации образцовых мер не должна превышать  $\delta_x = \pm (0,1 + 0,1 L)$  мкм — для класса 0;  $\delta_x = \pm (0,15 + 0,15 L)$  мкм — для класса 1, (здесь  $L$  — расстояние между штрихами в метрах).

Для прецизионного станкостроения на эталонной установке произведена аттестация двух образцовых штриховых метровых мер № 37 и 34, изготовленных ЭНИМС. Эти меры высшего класса точности были аттестованы по сантиметровым интервалам со средним квадратическим отклонением  $\sigma_x = 0,05$  мкм, а по общей длине с погрешностью 0,03 мкм. Отсюда следует, что даже по величине предельной погрешности  $3\sigma_x$  это не будет превышать допустимой погрешности аттестации мер 0 и 1 классов точности.

На эталонной установке ВНИИМ производилась также аттестация штриховых национальных эталонов ВНР и ПНР, которые ранее были аттестованы в международном бюро мер и весов (МБМВ); расхождения между значениями, полученными во ВНИИМ и МБМВ, находились в пределах допустимых погрешностей измерения от 0,01 до 0,05 мкм. Это также подтверждает то, что точность государственного эталона СССР такого же порядка, как и МБМВ.

На основании аттестации вторичных эталонов штриховых мер длины и сопоставления результатов наших измерений с результатами МБМВ можно с достаточной степенью достоверности считать, что воспроизведение единицы длины — метра на эталонной установке и передача ее размера вторичным эталонам может осуществляться с погрешностью  $2-3 \cdot 10^{-8}$ .

Таким образом, есть основания считать, что установленные в новой поверочной схеме для средств измерения длины требования к точности аттестации рабочих эталонов и образцовых мер 1-го разряда могут выполняться.

В результате анализа состояния национальных эталонов стран-членов СЭВ и проведенных взаимных сличений мер длины и образцовых установок Государственный первичный эталон СССР был рекомендован и принят в качестве эталона метра СЭВ.

### Новые пути повышения точности эталона единицы длины

С развитием науки и техники совершенствуется технология производства деталей машин и приборов, возрастают требования к точности линейных размеров. Точность эталона должна опережать требования промышленности.

Как было показано выше, эталон единицы длины на ближайший период времени по точности удовлетворяет запросам промышленности. В ряде научных исследований и в некоторых областях техники при измерении весьма малых линейных величин или для фиксирования перемещений каких-либо объектов с повышенной точностью используют интерферометры повышенной чувствительности [6], которые могут обеспечить (при измерении малых перемещений) результаты с точностью порядка  $3-5 \cdot 10^{-9}$ . В то же время с учетом современных запросов промышленности и ожидаемого повышения уровня этих требований задача дальнейшего повышения точности эталонных измерений остается актуальной. Одновременно с повышением точности эталона единицы длины необходимо решать задачи повышения точности методов и средств передачи размера единицы длины от эталона к образцовым мерам. Достижения за последние годы в области квантовой электроники по созданию стабилизированных газовых лазеров дают возможность обеспечить воспроизводимость длины волны на два порядка выше по сравнению с излучением криптона 86.

Опыт создания зарубежными фирмами лазерных интерферометров [7, 8] и исследования в лаборатории эталонов длины ВНИИМ показали, что на этой новой основе может быть повышена точность воспроизведения единицы длины, автоматизированы процессы аттестации рабочих эталонов и расширены пределы измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бржезинский М. Л., Колымагина Т. В., Марголина Г. М., Симяхина Г. В. Эталонная интерференционная установка для воспроизведения единицы длины и результаты ее исследования.— Труды метрологических институтов СССР, 1968, вып. 101 (151), с. 5—18 с ил.
2. Батарчукова Н. Р., Ирикова Л. А., Карташев А. И. Спектроинтерферометрическая установка для измерения длин волн и исследования контуров спектральных линий.— Труды метрологических институтов СССР, 1968, вып. 101 (151), с. 19—27 с ил.
3. Бржезинский М. Л., Марголина Г. М. Измерение показателя преломления воздуха при воспроизведении единицы длины на эталонном интерференционном компараторе.— «Метрология», 1972, № 5, с. 70—74 с ил.
4. Бржезинский М. Л., Зорин Д. И., Свердличенко В. Д. Фотоэлектрический микроскоп.— Труды метрологических институтов Госкомитета, 1965, вып. 78 (138), с. 43—48 с ил.
5. Зорин А. И., Шестопалов Ю. Н. Фотоэлектронные измерительные системы к двухлучевым интерферометрам.— Труды метрологических институтов СССР, 1968, вып. 101 (161), с. 69—76 с ил.
6. Бржезинский М. Л., Симяхина Г. В. Интерферометр повышенной чувствительности для измерения перемещений.— «Измерительная техника», 1972, № 5, с. 44—45.
7. Machouski Zbigniew, Puzewicz badeusz, Skida Lech, Borowiec Creslan. A laser device for displacement measurement.— «Optica Applicata», 1973, vol. III, N 2, pp. 21—24.
8. Karl Rau. Das Laserwegmeßsystem des VEB Carl Zeiss Jena.— «Jener Rdsch», 1974, 19, Sonderh, pp. 97—99.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.74.089.68

*В. Т. Мартынов*

ВНИИМ

#### АТТЕСТАЦИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЛИМБОВ

Основные метрологические характеристики многих угломерных приборов определяются качеством изготовления лимба (погрешностью нанесения (деления) штрихов лимба) и точностью его установки в приборе.

Под погрешностью деления штрихов лимба понимают отклонение осей штрихов от номинального положения.

С целью обеспечения высокоточных измерений при исследовании лимбов в лаборатории линейных и угловых измерений ВНИИМ разработан, изготовлен и исследован макет фотоэлектрической установки для аттестации лимбов — УФАЛ-1.

#### Технические характеристики установки

Пределы толщины исследуемых лимбов, мм . . . . .	30
Дискретность отсчетного устройства . . . . .	0,01"
Пределы измерения отклонений штриха лимба диаметром 300 мм . . . . .	$\pm 10''$

Линейное увеличение фотоэлектрических микроскопов	9 <sup>x</sup>
Общее увеличение визуальных микроскопов	135 <sup>x</sup>
Поле зрения фотоэлектрического канала, мм	0,5
Погрешность аттестации диаметров лимба	0,1 <sup>μ</sup>

Устройство и принцип действия установки УФАЛ-1 следующие. Установка состоит из двух основных узлов: прецизионного поворотного стола, на котором устанавливается исследуемый лимб, и четырех фотоэлектрических микроскопов с электронной системой отсчитывания (рис. 1).

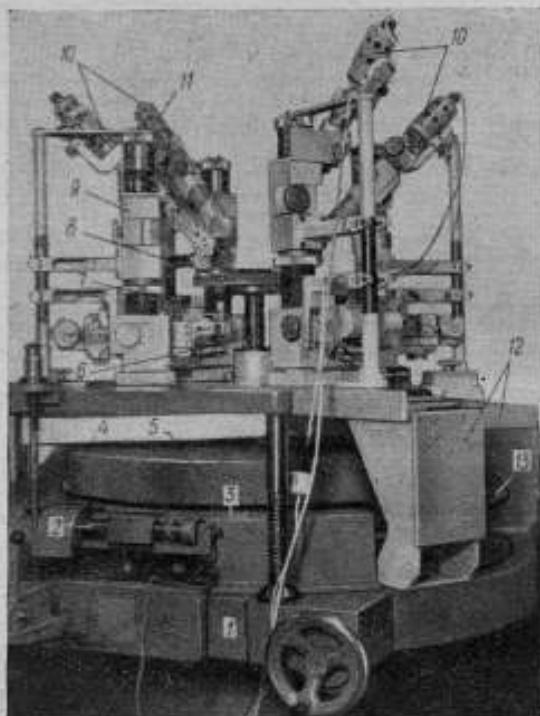


Рис. 1. Фотоэлектрическая установка:

1 — станнина; 2 — червячная пара; 3 — круглый стол; 4 — регулировочный винт предметного столика; 5 — предметный столик; 6 — кронштейн предметного столика; 7 — приемная часть фотоэлектрического микроскопа; 8 — исследуемый лимб; 9 — стойка; 10 — фотоэлектрические микроскопы; 11 — осветительная часть; 12 — кронштейны микроскопов; 13 — лимб круглого стола

Поворотный стол состоит из массивного, литого основания — станины 1 с прецизионной конической осью и круглого стола 3, составляющих одно целое. Коническая ось, расположенная вертикально, регулируется по высоте, в результате чего меняется зазор в подшипниках. Круглый стол имеет лимб 13 в виде кольца с делением и червячную пару 2. Перемещение стола на большие углы производится вручную, точные повороты — червячной парой.

На круглом столе 3 устанавливается регулируемый предметный столик 5 для установки исследуемого лимба 8. Стол имеет четыре винта для

радиальных, взаимно перпендикулярных смещений, с помощью которых исследуемый лимб устанавливается соосно с осью вращения установки, и три винта для регулирования по высоте. С помощью последних исследуемый лимб приводится в положение, перпендикулярное к оси вращения.

Два массивных кронштейна 12, расположенные по двум диаметрам поворотного устройства, закреплены на станине. На четырех вертикальных стойках 9, расположенных на концах кронштейнов, установлены фотоэлектрические микроскопы 10. Два микроскопа, установленные на концах одного кронштейна, наводятся на два штриха, расположенные в диаметральном противоположных точках исследуемого лимба. Один из кронштейнов неподвижно крепится на станине, а другой — подвижный может поворачиваться на требуемый угол вместе с двумя микроскопами при настройке установки. Микроскопы можно установить так, что линии, их соединяющие, будут пересекаться приблизительно под углом, равным контрольному\*. Более точная установка каждого микроскопа в отдельности выполняется юстировочными винтами.

Фотоэлектрические микроскопы 10, предназначенные для точного наведения на штрихи исследуемого лимба, состоят из осветителя 11, приемной части 7 и электронного измерительного блока.

Проходящим пучком света освещается штрих исследуемого лимба, изображение которого проектируется на плоскость вибратора приемной части. При отклонении штриха от оси колебания вибратора в фотоприемнике возникает ток, который после преобразования в электронном блоке поступает на обмотку вибратора. В результате вибратор смещается в направлении оси штриха лимба до их совпадения. Линейная величина смещения вибратора пропорциональна отклонению оси штриха лимба от контрольного угла в угловых единицах.

С целью уменьшения влияния температуры при нагреве осветителя, последний расположен на 300 мм выше плоскости исследуемого лимба. С этой же целью приемная часть микроскопа выполнена в горизонтальной компоновке и отнесена от оси вращения установки.

Для удобства эксплуатации каждый микроскоп имеет два независимых канала: визуальный с увеличением  $135\times$  и фотоэлектрический  $-9\times$ .

Электронная измерительная система содержит четыре идентичных канала измерения, каждый из которых связан с одним из четырех фотоэлектрических микроскопов.

Результаты сравнения поступают на цифровое табло с дискретностью  $0,01''$ . Отсчет на цифровом табло соответствует отклонению угла между двумя диаметрами лимба от контрольного угла, образованного осями вибраторов четырех фотоэлектрических микроскопов, в угловых единицах.

Выполнению измерений при аттестации лимба должна предшествовать настройка установки, включающая следующие операции: регулировку конической оси установки по высоте для исключения ее колебаний; приведение оси вращения установки в отвесное положение; определение колебания оси вращения; установку поверхности предметного столика перпендикулярно к оси вращения установки; центрирование исследуемого лимба; установку плоскости лимба перпендикулярно к оси вращения столика; установку микроскопов на заданный (контрольный) угол; определение цены деления и юстировка микроскопов.

Определение погрешностей диаметров лимба можно производить двумя способами: 1) калибровкой и 2) сравнением.

Способ калибровки заключается в последовательном сравнении углов, образуемых двумя парами диаметрально противоположных штрихов лимба, с контрольным углом ( $\beta$ ), образованным двумя парами диаметрально противоположных фотоэлектрических микроскопов. Угол между микроскопами остается стабильным в процессе одного цикла измерения. При измерении

\* Под контрольным понимается угол, образуемый двумя парами микроскопов и остающийся постоянным в течение одного цикла измерения. (Значения контрольных углов приведены в таблице).



микроскопы неподвижны, а исследуемый лимб поворачивают и соответствующие штрихи поочередно подводят под микроскопы.

При калибровке знание точного значения контрольного угла  $\beta$  не требуется, но его отклонение от номинального значения не должно превышать половины предела измерения фотоэлектрических микроскопов.

Постоянство значения угла  $\beta$  обеспечивается жесткостью конструкции и стабилизирующей внешней средой.

Для определения погрешностей диаметров лимба в единой системе и с одинаковым весом наблюдений пользуются способом Брунса. Этот способ заключается в использовании в определенном сочетании нескольких контрольных углов ( $\beta$ ), номинальные значения которых находятся в зависимости от интервала между исследуемыми диаметрами.

Интервал $\Delta\varphi$	Контрольный угол $\beta$	Число граней многогранных призм
1	45, 36, 20	8, 10, 18
2	90, 36, 20	4, 10, 18
3	60, 45, 36	6, 8, 18
4	36, 20	10, 18
5	45, 20	8, 18
6	90, 60, 36	4, 6, 10
8	36, 20	10, 18
9	45, 36	8, 10
10	90, 20	4, 18
12	60, 36	6, 10

Примечания: 1. При интервале  $\Delta\varphi=8^\circ$  измерения производят по всей окружности.

2. Многогранные призмы могут быть заменены другими с числом граней, кратным и приведенным. Например, призмы с числом граней 4, 6 и 8 могут быть заменены одной 24-гранной.

При аттестации лимбов измерения производят отдельными циклами при различных значениях контрольного угла, числе серий в цикле и количестве измеряемых углов в серии. Количество циклов измерения должно соответствовать числу контрольных углов. Например, при определении погрешности диаметров с интервалом через  $3^\circ$  производят три цикла измерений с контрольными углами  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $36^\circ$ . Количество серий в цикле определяется отношением номинального значения контрольного угла к интервалу поверяемых диаметров. Например, в 1-м цикле при  $\beta=60^\circ$  производят 20 серий измерений, во 2-м при  $\beta=45^\circ$  — 15 серий, в 3-м цикле при  $\beta=36^\circ$  — 12 серий.

Серии измерений отличаются друг от друга значениями начального диаметра. Количество измеряемых углов в серии соответствует числу контрольных углов, укладываемых в полуокружности. Например, в 1-м цикле в каждой серии измеряют три угла, во 2-м — четыре, в 3-м — пять.

На фотоэлектрической установке измерения производят в следующем порядке:

1) вращая поворотное устройство, нулевой штрих исследуемого лимба устанавливают против 1-го (ведущего) фотоэлектрического микроскопа; при этом против 2-го микроскопа должен быть штрих лимба, соответствующий углу ( $\beta$ ) (рис. 2);

2) производят отсчет по цифровому табло и записывают в журнал наблюдений;

3) вращают поворотное устройство против хода часовой стрелки на величину контрольного угла и устанавливают лимб так, чтобы против 1-го микроскопа оказался штрих, который перед этим был против 2-го микроскопа. Производят отсчет по цифровому табло.



Измерения производят на половине окружности лимба до «закрывания» исходного диаметра. При этом поворачивают лимб на угол, равный  $180^\circ - \beta$ , например на  $0-60^\circ$ ,  $60-120^\circ$ ,  $120-180^\circ$ . Вторую половину измерений той же серии производят, вращая лимб в обратном направлении.

Следующую серию измерений начинают, сместив лимб на величину интервала между исследуемыми диаметрами ( $\Delta\varphi$ ). Например, на  $3-63^\circ$ ,  $63-123^\circ$ ,  $123-183^\circ$ .

Выполнив измерения всех серий с одним контрольным углом (1-й цикл), приступают к измерениям следующего цикла с другим контрольным углом. Для образования другого контрольного угла перемещают кронштейн с парой микроскопов.

Поворот исследуемого лимба целесообразно производить с помощью визуального микроскопа и лимба поворотного устройства для грубой установки и по визуальному каналу фотоэлектрического микроскопа для точной установки.

При сличениях [2] измерения производят в такой же последовательности, как и при калибровке. Углы между гранями образцовой призмы принимают за контрольные углы. В качестве индикатора применяют фотоэлектрический автоколлиматор АФ-2 с ценой деления  $0,1''$ . При переходе к последующим сериям измерений многогранную призму поворачивают относительно лимба на угол  $\Delta\varphi$ , например на  $3^\circ$ . В каждом цикле применяют призмы с числом граней, указанным в таблице.

Отсчеты производят по одной паре фотоэлектрических микроскопов и автоколлиматору. При обработке результатов измерения учитывают отклонения углов между гранями призмы от номинального значения. Среднее квадратическое отклонение определения погрешностей диаметров лимба зависит от погрешности аттестации образцовой призмы.

Обработку результатов измерения способом калибровки выполняют по следующим формулам [4, 6].

Среднее арифметическое значение отсчетов:

$$\alpha = \frac{1}{2} (l_{пр} + l_{обр}), \quad (2)$$

где  $l_{пр}$  и  $l_{обр}$  — отсчеты при измерении в прямом и обратном ходах.

Среднее арифметическое значение угла между парами микроскопов:

$$\alpha_{ср} = \frac{1}{h} \sum_1^n \alpha_i, \quad (3)$$

где  $n$  — число углов в серии.

Погрешность угла между смежными диаметрами лимба в серии

$$\gamma = \alpha - \alpha_{ср}. \quad (4)$$

Контроль вычислений в серии производят по формуле:

$$\sum_1^n \gamma_i = 0. \quad (5)$$

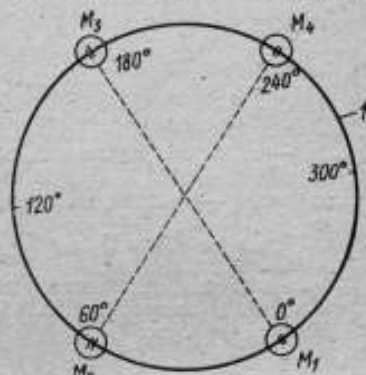


Рис. 2. Схема положения микроскопов:

$l$  — лимб;  $M_1-M_4$  — микроскопы

Вычисление погрешностей диаметров лимба и анализ их выполняют способами, рекомендованными в ГОСТ 13424—70\*.

При сличениях погрешности углов между смежными диаметрами в серии вычисляют по формуле:

$$\gamma = (i_{\varphi+\beta} - i_{\varphi}) - [A + (a_2 - a_1)], \quad (6)$$

где  $i_{\varphi}$  и  $i_{\varphi+\beta}$  — средние значения отсчетов, полученных по фотоэлектрическим микроскопам на диаметрах  $\varphi$  и  $\varphi+\beta$ ;  $A$  — действительное значение угла между соответствующими гранями призмы;  $a_1$  и  $a_2$  — отсчеты, полученные по автоколлиматору до и после поворота лимба.

Контроль вычислений производят по формуле (5).

Среднее квадратическое отклонение результата измерения полных погрешностей диаметра лимба ( $S_x$ ), определяемых способом калибровки, вычисляют по формуле:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum v^2}{m \cdot n (n-1)}}, \quad (7)$$

где  $m$  — число исследуемых диаметров лимба ( $m = \frac{180^\circ}{\Delta\varphi}$ ),  $n$  — число серий измерения,  $v$  — отклонение от среднего арифметического ( $v_{\varphi}^I = x_{\varphi}^I - x_{\varphi}^{cp}$ ;  $v_{\varphi}^{\text{II}} = x_{\varphi}^{\text{II}} - x_{\varphi}^{cp}$ ;  $v_{\varphi}^{\text{III}} = x_{\varphi}^{\text{III}} - x_{\varphi}^{cp}$ , римскими цифрами указаны номера циклов измерения).

Среднее квадратическое отклонение результата измерения полных погрешностей диаметров лимба ( $S_x$ ), определяемых способом сличения, вычисляют по формуле:

$$S_x = \sqrt{S_a^2 + S_n^2}, \quad (8)$$

где  $S_a$  — погрешность аттестации многогранной призмы;  $S_n$  — среднее квадратическое отклонение результата измерения, вычисляемое по формуле (7).

### Заключение

Высокоточная аттестация лимбов является необходимым условием изучения метрологических характеристик круговых делительных машин и влияющих на них внешних факторов.

Из двух описанных в настоящей работе способов аттестации способ калибровки обеспечивает более высокую точность и производительность измерений и обработки результатов. При этом способе погрешность аттестации лимба не превышает  $0,1''$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филоненко А. С., Щипицын Н. Г. Практикум по высшей геодезии. Исследование высокоточных геодезических инструментов. М., «Недра», 1965, с 97—102 с ил.
2. Каяк Л. К., Мартынов В. Т. Проверка лимбов теодолитов и других угломерных приборов по образцовым многогранным призмам. — «Измерительная техника», 1968, № 3, с. 11—12 с ил.
3. Богуславский М. Г., Мартынов В. Т., Элиашберг В. М., Каган А. М., Израилев В. М. Фотоэлектрическая установка для проверки высокоточных

\* ГОСТ 13424—70. «Теодолиты. Методы определения погрешностей диаметров горизонтального круга».

лимбов. Материалы семинара — «Опыт внедрения прогрессивных методов и средств технического контроля качества». ЛДНТП, 1975, с. 72.

4. Мартынов В. Т. Определение погрешностей делений лимбов теодолитов способом калибровки при помощи многогранных призм. — «Измерительная техника», 1971, № 1, с. 14—15 с ил.

Поступила в редакцию 21/IX 1975 г.

УДК 621.373.826.038.823.072.6 : 621.317.361.089.68

В. П. Капралов

ВНИИМ

## СТАБИЛИЗАЦИЯ ДЛИН ВОЛН ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ЛАЗЕРОВ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С МЕРОЙ ЧАСТОТЫ

Частотно-стабилизированные лазеры находят все большее применение при точных измерениях длины в качестве эталонного спектрального источника. Значительная интенсивность света и большая длина когерентности их

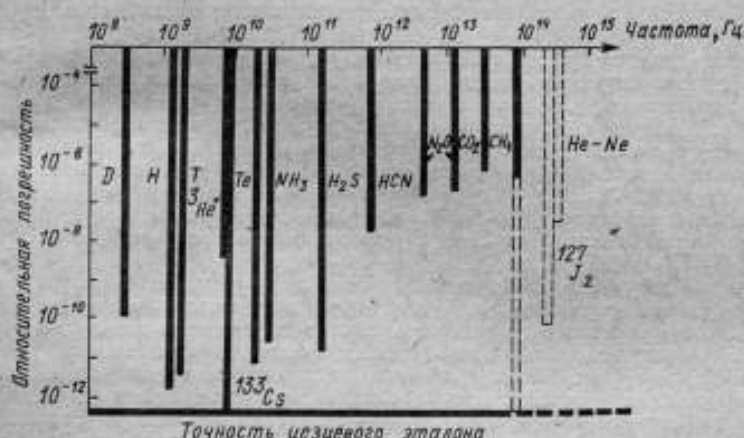


Рис. 1. Диаграмма характеристик переходов между энергетическими уровнями некоторых рабочих сред

излучения позволяет повысить предел и точность измерения длины интерференционным методом. Наибышие результаты по стабилизации частоты излучения частотно-стабилизированных лазеров известными методами [1—7] достигнуты для гелий-неонового лазера с внутренней метановой поглощающей ячейкой ( $5 \cdot 10^{-14}$  за 30 мин) [8]. Однако воспроизводимость длины волны излучения частотно-стабилизированных лазеров ниже воспроизводимости длины волны излучения орязжевой линии криптона—86, принятой за эталонную, и превосходит ее лишь в случаях применения внутренних поглощающих ячеек.

Смещение частоты газовых лазеров, превышающее иногда 0,15 МГц/Па [2] и обусловленное изменением плотности активной среды, уменьшает вос-

производительность длины волны их излучения. Причиной снижения воспроизводимости частоты является также изменение частоты и амплитуды излучения из-за нестабильности плазмы и зависимости частоты лазера от вольтамперных характеристик плазмы газового разряда. В настоящее время рассматривается возможность использования некоторых рабочих переходов, обладающих необходимой стабильностью и воспроизводимостью, в качестве эталонных в видимой и инфракрасной областях спектра [9]. На рис. 1 показана диаграмма точностных характеристик переходов между энергетическими уровнями некоторых рабочих сред. Наивысшей точностью обладает переход между энергетическими уровнями сверхтонкой структуры атомов  $^{133}\text{Cs}$ . Этот переход использован, например, в первичном эталоне частоты как репер привязки частоты кварцевого генератора.

Для повышения воспроизводимости длины волны излучения газовых лазеров используется синхронизация их излучения с частотой эталона времени [10]. В таких случаях воспроизводимость длины волны излучения ОКТ определяется не воспроизводимостью центра атомной линии усиления, а воспроизводимостью частоты квантового эталона времени, составляющей  $2 \cdot 10^{-12}$ . Для синхронизации частоты в таких устройствах применяются следующие методы: умножение и синтез радиочастот в оптический диапазон, синхронизация бией мод лазера с радиочастотой и частотная модуляция излучения лазера при больших индексах модуляции. Рассмотрим эти методы.

#### Метод умножения и синтеза радиочастот в оптический диапазон

Получение генерации лазеров в инфракрасной области спектра позволило синхронизировать частоту излучения его с радиочастотой, а также проводить непосредственное измерение частот излучения в этой области спектра. Сравнение частот производят путем гетеродирования излучения лазера с гармоникой радиочастоты эталона времени. Так, в работе [11] осуществлена синхронизация частоты излучения лазера на цианистом водороде  $\text{HCN}$  ( $\nu_1=890$  ГГц,  $\nu_2=960$  ГГц) с 12 и 13-й гармоникой излучения квантового генератора ( $f_n=74234, 864$  МГц), синхронизированного с помощью фазовой автоподстройки с гармоникой сигнала кварцевого генератора ( $f_{к.г}=120$  МГц), при этом частота кварцевого генератора контролировалась по рубидиевому эталону. Блок-схема устройства синхронизации частоты лазера с радиочастотой кварцевого генератора показана на рис. 2.

Некоторые результаты синхронизации абсолютной частоты лазеров на цианистом водороде, полученные разными авторами, представлены в табл. 1 [12—16]. Расширение высокочастотного диапазона синхронизации излучения газовых лазеров с радиочастотой эталона достигается применением промежуточных лазеров ИК диапазона [18—25]. В схемах используются гармоники частот излучения промежуточных лазеров, связанных системой автоподстройки с радиочастотой. В качестве смесителя используются точечно-контактные диодные пары никель-вольфрам [17]. Блок-схема устройства синхронизации излучения гелий-неонового лазера  $\lambda=3,39$  мкм с радиочастотой цезиевого эталона показана на рис. 3 [26].

Синхронизация частоты излучения  $\text{He-Ne}$  лазера ( $\lambda=3,39$  мкм) по рассмотренной схеме позволяет достичь долговременной стабильности частоты  $\sim 5,6 \cdot 10^{10}$ . В принципе возможна синхронизация видимой линии гелий-неонового лазера.

#### Метод синхронизации бией мод лазера с радиочастотой эталона

Для создания оптического дискриминатора в этом случае используются дисперсионные свойства активной среды, позволяющие изменять частоту бией продольных мод при перестройке резонатора [28]. Относительная стабильность частоты лазера с системой АПЧ, использующей метод

Тип лазера	Частота излучения, ТГц	Относительная погрешность спектроанализа	λ, мкм	Мощность излучения, мВт	Частота излучения, ТГц					
					Лазера ОКГ-1		Лазера ОКГ-2		Классификация	
					n <sub>1</sub>	ν <sub>1</sub> , ТГц	n <sub>2</sub>	ν <sub>2</sub> , ТГц	n <sub>3</sub>	ν <sub>3</sub> , ТГц
HCN (1967 г.), [10]	0,8947509	—	372,5283	—	1	0,890	—	12	74	
HCN (1969 г.), [18]	0,890758368	1·10 <sup>-6</sup>	336,5578	100	1	0,890	—	To же	To же	
HCN (1967 г.), [9]	0,890752	5·10 <sup>-6</sup>	336,5578	—	—	—	—	»	»	
HCN (1970 г.), [7]	0,89075407	2·10 <sup>-7</sup>	336,5578	—	—	—	—	»	»	
HCN (1967 г.), [8]	0,8907595	1·10 <sup>-7</sup>	336,5578	10	1	0,890	—	»	»	
HCN (1967 г.), [10]	0,8907607	—	336,5578	—	1	0,980	—	»	74,234	
HCN (1970 г.), [11]	0,8907596	—	336,5578	—	1	0,960	—	»	74,3	
HCN (1967 г.), [10]	0,8944142	—	335,1831	—	1	0,960	—	»	74,3	
HCN (1967 г.), [10]	0,9603034	—	310,8870	—	1	0,960	—	»	75,0	
HCN (1967 г.), [10]	0,9679658	—	309,7140	—	1	0,890	—	»	75,0	
D <sub>2</sub> O (1968 г.), [13]	1,3612826	—	220	—	3	0,891	—	—	—	
D <sub>2</sub> O (1968 г.), [13]	1,4667870	—	204,38721	—	3	0,891	—	—	—	
D <sub>2</sub> O (1967 г.), [14]	1,5392570	—	194,7644	—	—	—	—	—	70,0	
D <sub>2</sub> O (1967 г.), [14]	1,5777890	—	190,0080	—	—	—	—	—	70,0	
D <sub>2</sub> O (1967 г.), [14]	2,5279528	4·10 <sup>-6</sup>	118,59101	—	3	0,891	—	17	148,0	
H <sub>2</sub> O (1969 г.), [15]	3,567143	2·10 <sup>-7</sup>	84	—	4	0,890	—	12	74,0	
H <sub>2</sub> O (1969 г.), [17, 24]	3,821775	3·10 <sup>-7</sup>	78	75	6	0,890	0,890	3	29,0	
H <sub>2</sub> O (1969 г.), [18, 21]	10,718073	2·10 <sup>-7</sup>	28	30	12	0,891	—	1	29,0	
CO <sub>2</sub> (1969 г.), [18, 21]	28,359800	—	10,6	350	3	10,718	3,821	2	27,0	
CO <sub>2</sub> (1969 г.), [19, 22]	28,306251	—	10,6	350	3	10,718	3,821	1	26,0	
CO <sub>2</sub> (1969 г.), [20]	32,134269	—	9,3	—	3	10,718	3,821	1	27,0	
CO <sub>2</sub> (1969 г.), [20]	32,176084	—	9,3	—	3	10,718	—	1	22,0	
He-Ne (1972 г.), [26]	88,376181627	1·10 <sup>-10</sup>	3,39	1	3	29,942	—	—	48,7	
He-Ne (1972 г.), [33]	473,612166	1·10 <sup>-9</sup>	0,63	0,5	—	—	—	—	—	

n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>, n<sub>3</sub> — номера гармоник.



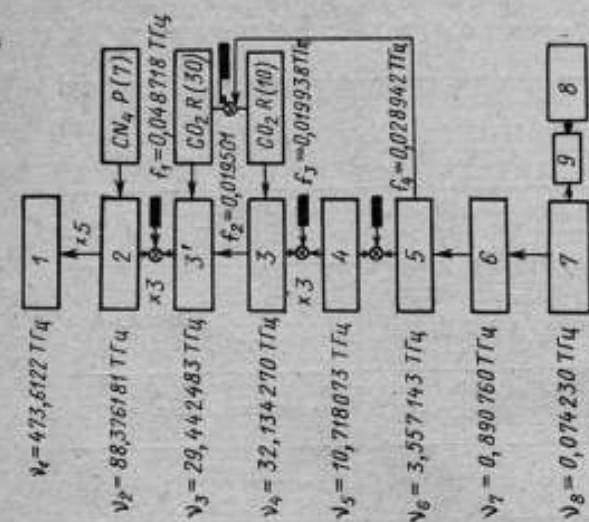


Рис. 3. Блок-схема устройства синхронизации частоты лазера инфракрасного диапазона ( $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ )

1 — He — Ne лазер ( $\lambda_0 = 0,63 \text{ мкм}$ ); 2 — He — Ne лазер ( $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$ ); 3 —  $\text{CO}_2$  лазер ( $\lambda_0 = 29,94 \text{ мкм}$  и  $\lambda_0 = 32,13 \text{ мкм}$ ); 4 —  $\text{H}_2\text{O}$  лазер ( $\lambda = 10,7 \text{ мкм}$ ); 5 —  $\text{HCN}$  лазер ( $\lambda = 3,66 \text{ мкм}$ ); 6 —  $\text{HCN}$  лазер ( $\nu = 890 \text{ ГГц}$ ); 7 — кварцевый генератор; 8 — цезиевая квантовая мера частоты; 9 — система ФАП

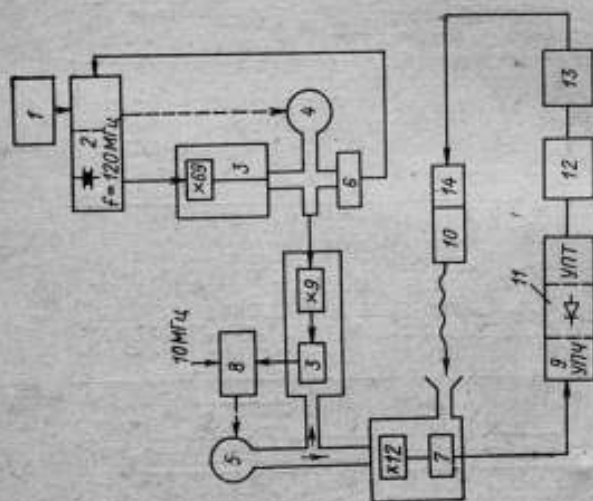


Рис. 2. Блок-схема устройства синхронизации частоты лазера на цинкстом водороде ( $\lambda = 337 \text{ мкм}$ ) с радиочастотой эталона

1 — стабилизатор частот  $\text{He-Ne}$  5100А; 2 — кварцевый генератор ( $f_{\text{кв}} = 120 \text{ МГц}$ ); 3 — умножитель частоты; 4, 5 — клистроны; 6, 7 — смеситель частот; 8 — система ФАП кварцевого генератора; 9 — УПЧ; 10 —  $\text{HCN}$ -лазер; 11 — дискриминатор и УПЧ; 12 —  $\text{H}_2$  лазер; 13 — 2 мсек.; 14 — измерительный элемент АЧХ лазера



сравнения биений мод с радиочастотой, может быть оценена следующим параметром:

$$S_{\lambda} = S_{\omega} (v/v_{\omega}) [dF(v_0 - v_{\lambda})/dv_{\lambda}], \quad (1)$$

где  $\frac{dF(v_0 - v_{\lambda})}{dv_{\lambda}}$  — крутизна частотной характеристики в рабочей точке;

$S$  — стабильность длины волны излучения лазера;  $S_{\omega}$  — стабильность частоты опорного генератора радиодиапазона;  $v_{\omega}$  — частота опорного генератора системы стабилизации;  $v_0$  — центральная частота атомного перехода стабилизации;  $v_{\lambda}$  — частота излучения лазера.

Крутизна частотной характеристики оптического дискриминатора находится в пределах  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  [29]. Экспериментально для He—Ne лазера ( $\lambda=0,63$  мкм) было получено ее значение, равное  $2,6 \cdot 10^{-3}$  [31].

Для He—Ne лазера  $\lambda=0,63$  мкм, стабилизированного по сигналу генератора радиодиапазона, можно получить относительную нестабильность до  $10^{-14}$ — $10^{-15}$  [29]. Экспериментальные исследования этого метода выполнены в работах [30] и [31]. В [30] осуществлена синхронизация частоты биений между продольными модами с эталоном частоты.

Получена кратковременная стабильность частот биений между модами порядка  $10^9$ . Результаты стабильности оптической частоты не приведены. В работе [31] в схеме синхронизации был использован фотоэлектронный умножитель с динамическим преобразователем частоты (ФЭУ с ДПЧ). Излучение ЛГ-56 в режиме генерации двух частот ( $\Delta v=510$  МГц) направляли на ФЭУ с ДПЧ. Частоту биений преобразовывали модуляцией скорости электронов пучка фотокатода с частотой внешнего генератора ГЧ-31 с последующим группированием электронов по плотности в пространстве дрейфа для усиления сигнала промежуточной частоты  $f_{\text{вк}}=30$  МГц, который затем направляли в частотный детектор. Сигнал с выхода детектора усиливали и направляли на пьезокерамический элемент системы АПЧ лазера.

Стабильность частоты лазера с включенной системой АПЧ составляла  $2 \cdot 10^9/\text{мин}$  и  $5 \cdot 10^9/\text{ч}$  ( $\tau=10$  с,  $\tau$  — время усреднения). Относительная стабильность частоты опорного генератора ГЧ-31 после прогрева в течение двух часов не превышала  $4 \cdot 10^9/\text{ч}$ . Таким образом, стабильность оптической частоты лазера значительно превышает стабильность опорного генератора.

В настоящей работе экспериментально осуществлена синхронизация частоты биений мод и стабилизация длин волн He—Ne лазера ( $\lambda=0,6328$  мкм) по частоте  $\sigma_0$  — перехода в пучке атомов  $^{133}\text{Cs}$ , возбуждаемого в атомно-лучевом радиоспектроскопе пассивного квантового стандарта частоты радиодиапазона. В экспериментах (рис. 4) использовался  $^3\text{He}$ — $^{20}\text{Ne}$  лазер 1, пассивный атомно-лучевой КСЧ на пучке атомов  $^{133}\text{Cs}$  (9—12) и система АПЧ опорного радиогенератора 7. Частотным дискриминатором для кварцевого генератора  $f=5,319$  МГц системы АПЧ квантового стандарта служил  $\sigma_0$  — переход  $Fm_F(4,0) - (3,0)$  атомов  $^{133}\text{Cs}$ , возбуждавшийся в радиоспектроскопе 10. Оптический дискриминатор системы АПЧ лазера использовал дисперсионные свойства активной среды при конкуренции двух продольных мод. Эффект конкуренции мод при их симметричном расположении относительно центра атомной линии изотопа  $^{20}\text{Ne}$  значительно увеличивает крутизну частотной характеристики дискриминатора в рабочей точке. Двухчастотный режим генерации He—Ne лазера контролировался сканирующим интерферометром с трехзеркальным резонатором бегущей волны, ФЭУ и осциллографом. Преобразование частоты биений мод ( $\Delta v=510$  МГц) осуществлялось ФЭУ с ДПЧ [31]. Сигнал с выхода УПЧ направляли на фазовый детектор 5. Сигнал рассогласования с выхода фазового детектора поступал на вход усилителя 6 и далее на пьезокерамический исполнительный элемент лазера 1. Система АПЧ опорного генератора 7 включала квантовый стандарт частоты (блоки 10—12), синтезатор частот, смеситель, УПЧ, детектор и усилитель постоянного тока с исполнительным элементом регулировки частоты генератора. Оптическая часть экспериментальной установки, размещенной на специальном виброизолиру-



квантовой меры частоты и СВЧ модуляции излучения лазера. При этом разность между частотами лазера, настроенного на максимумы пропускания внешнего интерферометра, измеряют с высокой точностью и, зная отношение порядков интерференции, вычисляют значение оптической частоты. Таким образом, измерение высоких частот ( $10^{14}$ — $10^{15}$  Гц) сводится к измерению относительно низких радиочастот [33]. Такое устройство работает в видимой области спектра, обладает воспроизводимостью  $\lambda \approx 1 \cdot 10^9$  и может быть использовано для точного измерения длины интерференционным методом.

Синхронизация частоты биений между модами с радиочастотой эталона времени и повышение воспроизводимости длины волны синхронизируемого лазера позволяет установить единый эталон, основанный на эталоне времени и частоты, например, на цезиевой пассивной квантовой мере частоты.

#### Методы частотной модуляции лазерного излучения при больших индексах модуляции

При частотной модуляции излучения лазера с большими индексами образуется широкий спектр модуляции. Спектр модулированного излучения состоит из множества линий, одна из которых сдвигается в диапазон СВЧ и может использоваться для получения нулевых биений с гармоникой генератора микроволнового диапазона [34].

Существенным недостатком метода является значительная мощность генераторов, питающих модулятор на кристалле КДР. Повышение воспроизводимости частоты ОКГ может быть достигнуто методом автостабилизации, заключающимся в использовании стабильного по частоте внешнего индуцирующего СВЧ излучения [35]. Исходное СВЧ излучение при этом может привязываться к квантовой мере частоты. Однако ввиду быстрого уменьшения мощности гармоник СВЧ излучения с увеличением их номера применимость метода ограничена инфракрасным диапазоном.

Таким образом, методы синхронизации излучения лазеров с мерой частоты и экспериментальные исследования синхронизации биений продольных мод с радиочастотой позволили осуществить перенос стабильности частоты радиодиапазона в оптический и увеличить стабильность длины волны излучения газовых лазеров. Кроме того, создание частотно-стабилизированных лазеров, синхронизованных с частотой квантово-механического репера (например, цезиевого атомно-лучевого стандарта частоты), позволит перейти к единому эталону длины, времени и частоты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Н. Г., Летохов В. С. Оптические стандарты частоты.— «Успехи физических наук», 1968, № 12, с. 585—631.
2. Birnbaum G., Frequency stabilisation of gas lasers "Proce. IEEE", 1967, N 6, pp. 1015—1025.
3. Laures P., Stabilization de la frequency des lasers a gas.— "L'Onde Electrique", 1966, N 469, pp. 455—462.
4. Wallard A. J. The frequency stabilisation of gas lasers.— "Scientific Instruments", 1973, N 9, pp. 793—807.
5. Boyne H. S., Laser frequency stabilisation techniques.— "IEEE Trans. Instr.", 1971, N 1, pp. 19—32.
6. Бузыгин А. С., Капранов В. П. Частотно-стабилизированные лазеры в радиоэлектронных системах.— «Радиоэлектроника за рубежом», М., НИИЭИР, 1972, № 13, 48 с.
7. Галутва Г. В., Рязанцев А. И. Селекция типов колебаний и стабилизация частоты оптических квантовых генераторов, М., «Связь», 1972, 72, с.
8. Басов Н. Г., Беленов Э. М., Вольнов М. И. и др. Частотная стабилизация газового лазера с использованием взаимодействия мод. «Письма в ЖЭТФ», т. 15, 1972, № 9, с. 525—528.

9. Халфорд Д., Хеллинг Н., Уэллс Н.—«Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике», т. 60, 1972, № 5, с. 188.

10. Hocker L. O., Javan A., Ramachandra Rao. P., et al. Absolute frequency measurement.—"Appl. Phys. Letters", 1967, pp. 147—148.

11. Cup R. E., Corcoran U. J., Gallagher J. J. Methods of the stabilisation and measurement the frequency of lasers", "Opt. spektra", 1970, N 1, pp. 46—51.

12. Hocker L. O., Javan A., Ramachandra R. D., Frenkel L., Sullivan T. Absolute frequency measurement and spectroscopy of the HCN laser transition in the far infrared.—"Appl. Phys. Lett.", 1967, N 2, pp. 61—64.

13. Бондарев В. А., Валитов Р. А., Жаботинский М. Е. и др. Измерение частоты ОКГ на HCN.—«Измерительная техника», 1970, № 11, с. 5—8.

14. Bradley C. G., Knight D., J. E. Absolute frequency measurement of a  $CF_2CH_2$  absorption line near HCN laser.—"Phys. Letter", 1970, N 2, pp. 59—60.

15. Hocker L. O., Javan A., Pollack M. A. and Bridges T. J. Absolute frequency measurement on new CW HCN submillimeter laser lines.—"Phys. Letter", 1967, N 7, pp. 489—490.

16. Evenson K. M., Wells J. S., Mattarrase L. M., Etwell L. B. Absolute frequency measurement  $H_2O$  laser.—"Appl. Phys. Lett.", 1967, pp. 344—345.

17. Evenson K. M., Wells J. S., et al. Absolute measurement water vapour laser transition.—"Appl. Phys. Lett.", 1970, N 4, pp. 159—162.

18. Bennett W. S., Pollack M. A. and Tomlinson. Absolute measurement optical frequency.—"IEEE J. of Quantum Electronics", 1969, p. 168.

19. Daneau V., Sokoloff P., et al. Absolute measurement and extension of laser harmonic frequency mixing technique into the  $9 \mu$  region.—"Appl. Phys. Lett.", 1969, N 12, pp. 398—401.

20. Дюда для точного измерения скорости света.—«Электроника», т. 44, 1971, № 21, с. 23—24.

21. Chang T. Y. Accurate frequency and wavelength at CO laser lines.—"Opt. Commun.", 1970, N 7, pp. 77—80.

22. Corcoran V. J., Smith W. T. Laser millimeter wave technique.—"Appl. Optics", 1972, N 2, pp. 269—272.

23. Mc. Donald D. G., Rissley A. C., Cupp J. D., Evenson K. M. Harmonic mixing of microwave and far-infrared laser radiation using a Josephson function.—"Appl. Phys. Lett.", 1971, N 2, pp. 162—164.

24. Bradley C. C., Knight D. J. Frequency locking HCN laser to absorption line.—"Electron letters", 1971, N 13, pp. 381—382.

25. Papes presented at the 4th Int. Conf. on atomic Masses and Fundamental Constants.—"Nat. Phys. Lab. Teddington. England", sept. 1971, N 9.

26. Evenson K. M., Day G. W., Wells J. S. and Mullen L. O. Extension of absolute frequency measurement to the CW He-Ne laser at 88 THz (3,39 mkm).—"Appl. Phys. Lett.", 1973, N 4, pp. 196—199.

27. Barger R. L., Hall J. L. Wavelength of the 3,39 laser saturated absorption line at methane.—"Appl. Phys. Lett.", 1973, N 4, pp. 196—199.

28. Mc. Farlane R. A. Frequency pulling and pushing in the He-Ne lasers.—"Phys. Rev.", 1964, N 34, pp. 543—550.

29. Башкин А. С., Беленков Э. М., Гончуков С. А. Стабилизация частоты лазера методом сравнения с радиочастотой.—«Квантовая электроника», 1971, № 2, с. 40—48.

30. Gouldick H. P. Locking of beat frequency two modes laser.—"Proc IEEE", 1965, N 6, pp. 738.

31. Капралов В. П. Применение фотоэлектронного умножителя с динамическим преобразователем частоты в системе стабилизации длины волны излучения лазера. «Приборы и техника эксперимента», 1974, № 5, с. 162—165.

32. Цугулиев А. И., Капралов В. П., Булыгин А. С. Преобразование частоты оптического квантового генератора в радиодиапазон. Сб. «Использование ОКГ в современной технике», ч. II, Изд. ЛДНТП, 1969, с. 67—74.





сором 3 на щель 4 и после объектива 5 параллельный пучок зеркалом 7 направляется на разделяющую пластину 15, а затем — на основные зеркала 17 и 23. Основные отражатели выполнены в виде плоских зеркал. Зеркало 17 перемещается вместе со штриховой мерой 18, а то время как относительное зеркало 23 в процессе измерения остается неподвижным. Интерферометр Фабри-Перо 6 служит для слежения за режимом работы лазера. Световой диаметр зеркал 60 мм позволяет использовать другие монохроматические источники света (криптон, кадмий, ртуть) — для измерения методом совпадения дробных частей порядка интерференции, а также источник белого света — для сравнительных измерений по образцовой концевой мере или по эталону Фабри-Перо [2].

Наблюдательная система проектирует изображение интерференционных полос в устройство 12, 13, служащее для разделения светового потока на

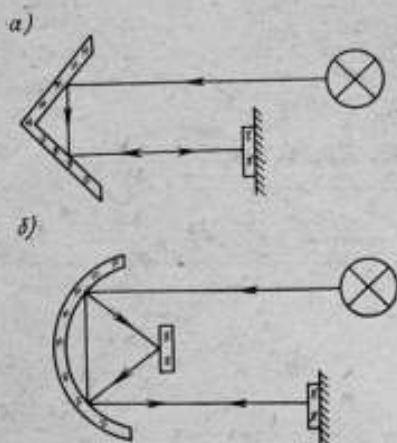


Рис. 2. Варианты отражателей в ветви подающего зеркала: а — с уголковым зеркалом; б — со сферическим зеркалом

четыре канала и преобразования его в электрические сигналы. Вспомогательные зеркала 7, 8, 14, 16 и автоколлимационный окуляр 2 применяются для юстировки интерферометра.

На массивной станине смонтированы основные узлы прибора: источник света, кронштейн с преобразователем, мост с оптическими деталями интерферометра, балка с микроскопами, осветительный коллиматор и две каретки, несущие основные зеркала.

В продольном пазу станины перемещается на направляющих качения 11 (см. рис. 1) каретка. Направляющие — два плоских стальных бруска с доведенными вертикальными плоскостями — укреплены на каретке и обкатываются подшипниками, имеющими регулировку в эксцентрических осях. Доведенные горизонтальные плоскости расположены непосредственно на каретке. Высокая прямолинейность направляющих ( $1-2''$ ), а также использование узкого пучка лазера позволяет при применении плоских зеркал обеспечить постоянство сдвига фаз в пределах, требуемых для счета полос [3].

При изменении прямолинейности перемещения и необходимости получения большей чувствительности интерферометра изготовлены отражатели — триэдры и блоки со сферическими зеркалами для работы по оптической схеме (рис. 2, а и б) [1].

В верхней части каретки смонтирована платформа 19, имеющая малые поступательные перемещения в шариковых направляющих. Эти перемещения получают за счет установленного в корпусе основной каретки механизма 20 (см. рис. 1), сочетающего винтовую подачу с деформациями пьезокерамического элемента, управляемого напряжением постоянного тока. На платформе укреплен основной отражатель 17 и люнет со штриховой мерой 18, конструкция которого обеспечивает регулировку меры по фокусу и азимуту. В нижней части люнета имеется щель для освещения шкал проходящим светом.

Механизм подачи основной каретки укреплен в нижнем пазу станины. По ходовому винту с шагом 1 мм перемещаются две гайки, стянутые между собой пружинами для устранения люфтов. Верхний палец гайки передает движение каретке, контактируя сферой с плоской поверхностью опоры. Постоянство контакта обеспечивается пружинами. Нижний палец гайки также подпружинен и ограничивает вращение гайки благодаря дополни-



тельным направляющим. Винт приводится во вращение через упругую муфту 21 от электропривода 22 (редукция 1:200).

Каретка 24 относительного зеркала 23 расположена параллельно каретке основного; конструкция предусматривает необходимые степени свободы для юстировки и перенастройки интерферометра: поступательное перемещение (грубое и тонкое) вдоль линии измерения, наклоны в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Рычаги 25 управления кареткой с относительным зеркалом выведены наружу. Механизмы наклонов зеркала имеют высокую чувствительность, получаемую за счет сочетания зубчатых пар с клиновыми механизмами; один оборот рукоятки механизма соответствует повороту стола на  $10^\circ$ .

Два фотоэлектрических микроскопа 9 и 10 [4] позволяют производить одновременно измерение двух интервалов одной шкалы или двух шкал с тем же полюс, а также их компарирование. В последнем случае счетом полюс измеряются малые разности. Микроскопы применяются как для фотоэлек-

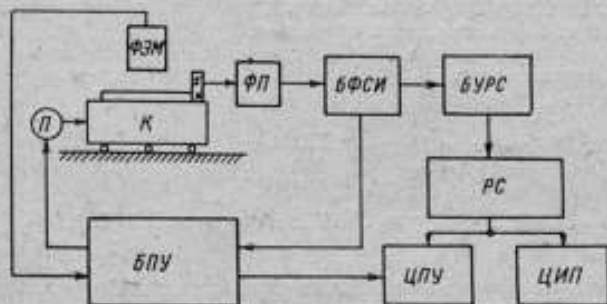


Рис. 3. Блок-схема интерференционной установки с электронной аппаратурой

трической регистрации положения штриха, так и визуальных наблюдений. Микроскоподержатели перемещаются вдоль и перпендикулярно базке; тубусы микроскопов имеют микроподачу для фокусировки. Шкалы освещаются в проходящем и отраженном свете. Для освещения в проходящем свете используется зеркало, связанное с микроскопом, благодаря чему все штрихи освещаются лучком света, проектируемым одними и теми же участками зеркала.

Интерференционная картина на выходе зеркалами 8 и 14 проектируется в фотоэлектрическое приемное устройство 12, 13, смонтированное на массивном кронштейне снаружи прибора. Интерферометр установлен на фундаменте глубокого залегания. Амортизация прибора достигнута массивной плитой на резиновых подушках. В электронную аппаратуру интерферометра (рис. 3) входит блок программного управления БПУ, обеспечивающий автоматический, полуавтоматический или ручной режимы управления приводом П каретки К интерферометра; система, которая осуществляет счет полюс и регистрацию результатов измерения, и фотоэлектрический микроскоп ФЭМ для наведения на штрихи аттестуемой шкалы.

Аппаратура счета содержит следующие основные узлы: фотоэлектрический преобразователь ФП, блок формирования счетных импульсов БФСИ, формирующий из сигналов фотоэлектрического преобразователя счетные импульсы; реверсивный счетчик РС, осуществляющий накопление счетных импульсов; блок управления реверсивным счетчиком БУРС; цифровое табло индикации перемещения ЦИП; цифробпечатывающее устройство ЦПУ для регистрации измерительной информации.

Фотоэлектрический преобразователь, преобразующий световой поток от интерференционной картины в электрические сигналы, в отличие от преды-

дущих схем [5], выполнен по четырехканальной системе. Он содержит четыре фотоприемника, анализирующие диафрагмы которых расположены в плоскости интерференционной картины.

Выходные электрические сигналы ФП

$$e_i = E_i [1 + m \sin(\theta + \varphi_i)], \quad (1)$$

где  $i=1, 2, 3, 4$  — номер фотоприемника;  $E_i$  — постоянная составляющая сигнала, величина которой зависит от чувствительности фотоприемника, размеров анализирующей диафрагмы и среднего уровня освещенности интерференционной картины;  $m$  — коэффициент модуляции сигнала, зависящий от контрастности интерференционных полос;  $\varphi_i$  — постоянный фазовый сдвиг сигнала, определяемый пространственным положением анализирующей диафрагмы фотоприемника и настройкой оптической схемы интерферометра;  $\theta$  — текущая пространственная фаза сигнала  $\theta = \frac{4\pi}{\lambda} \delta$ ;  $\delta$  — оптическая разность хода интерферирующих пучков, зависящая от перемещения каретки;  $\lambda$  — длина волны источника излучения.

Сигналы (1) поступают в БФСН, где осуществляется выравнивание их постоянных составляющих  $E_i$  и попарное вычитание сигналов  $e_i$ ; в результате образуются два сигнала

$$e_{21} = e_2 - e_1 = E \sin \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \cos \left( \theta + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right); \quad (2a)$$

$$e_{43} = e_4 - e_3 = E \sin \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{2} \cos \left( \theta + \frac{\varphi_3 + \varphi_4}{2} \right).$$

Соответствующей настройкой оптической схемы добавляются следующие значения фазовых сдвигов сигналов:

$$\varphi_1 = 0; \quad \varphi_2 = \pi; \quad \varphi_3 = \frac{\pi}{2}; \quad \varphi_4 = \frac{3}{2}\pi.$$

В этом случае сигналы (2) принимают вид:

$$e_{21} = E \sin \theta; \quad (2)$$

$$e_{43} = E \cos \theta.$$

Затем из сигналов (2) формируются счетные импульсы с дискретностью равной  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/8$  или  $\lambda/32$ . Требуемая дискретность отсчета перемещения задается перед началом измерения. При этом дискретность отсчета  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ,  $\lambda/8$  обеспечивается амплитудным интерполатором [6], а дискретности  $\lambda/32$  — фазовым интерполатором, блок-схема которого приведена на рис. 4.

Сигналы (2) поступают на прерыватели (ключи) П1...П4, которые управляются от генератора несущей частоты ГНЧ периодическими последовательностями прямоугольных импульсов

$$a_i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_i \left[ t - \left( n + \frac{i-1}{4} \right) T \right]. \quad (3)$$

Здесь  $i=1, 2, 3, 4$  — номер последовательности, генерируемой ГНЧ;  $T$  — период следования прямоугольных импульсов;

$$A_i(t) = \begin{cases} 1, & \left| t - \frac{i-1}{4} T \right| \leq \frac{T}{4}; \\ 0, & \left| t - \frac{i-1}{4} T \right| > \frac{T}{4}. \end{cases}$$

После прерывателей дискретизированные сигналы  $e_{21}$  и  $e_{43}$  суммируются суммирующим усилителем  $СУ$ , как показано на рис. 4, образуя результирующий сигнал вида

$$u_{\Sigma}(t) = U \sqrt{e_{21}^2 + e_{43}^2} \sum_{r=1}^{\infty} \frac{1}{r} \sin \left[ r \omega_0 t + \arctg \left( \frac{e_{21}}{e_{43}} \sin \frac{\pi r}{2} \right) \right], \quad (4)$$

где  $\omega_0$  — частота следования прямоугольных импульсов, определяемых выражением (3);  $r=1, 3, 5, \dots$  — номер гармоники. Из сигнала (4) полосовой фильтр  $ПФ$  выделяет только первую гармонику ( $r=1$ )

$$u_1(t) = U_1 \sqrt{e_{21}^2 + e_{43}^2} \sin \left[ \omega_0 t + \arctg \frac{e_{21}}{e_{43}} \right], \quad (5)$$

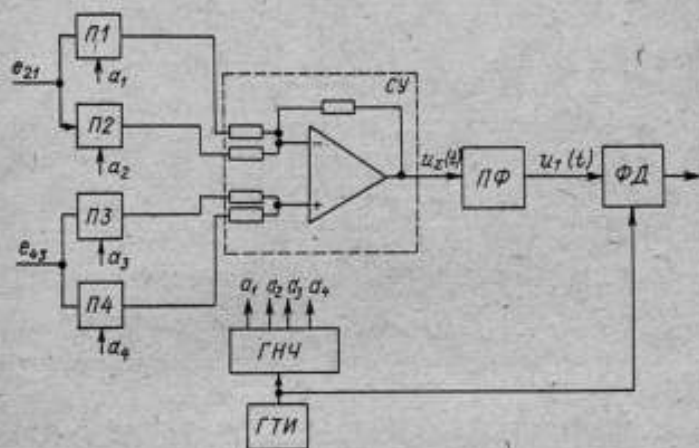


Рис. 4. Принципиальная схема аппаратуры для получения фазовой модуляции

которая поступает затем на вход фазового детектора  $ФД$ . Если выполняется условие (2), то

$$u_1(t) = U_1 \sin(\omega_0 t + \theta), \quad (6)$$

т. е. на выходе  $ПФ$  присутствует синусоидальный сигнал, частота  $\omega_0$  которого равна частоте дискретизации сигналов  $e_{21}$  и  $e_{43}$ , а фаза  $\theta$  — тождественно равна пространственной фазе интерференционных полос. Таким образом, измерение фазы сигнала (5) эквивалентно измерению пространственной фазы интерференционных полос, а следовательно, и измерению перемещения каретки интерферометра.

Полосовой фильтр  $ПФ$  осуществляет подавление высших гармоник, присутствующих в сигнале (4) и вызывающих погрешность измерения фазы первой гармоники. Фазовый детектор  $ФД$  производит отсчет приращения фазы сигнала (5) и выдает результат в виде счетных импульсов. Структурная схема и временные диаграммы, поясняющие работу  $ФД$ , даны на рис. 5, а и б.

Сигнал  $u_1(t)$  с выхода полосового фильтра поступает на формирователь  $\Phi$  (рис. 5, а). Прямоугольные импульсы с выхода  $\Phi$  поступают на схему тактирования  $СТ$ . Как видно из рис. 5, б, выходной сигнал  $u_{СТ}$  отли-

чается от сигнала  $u_d$  лишь тем, что моменты перехода его из состояния логической «1» в логический «0» и обратно «привязаны» по времени к одному из тактовых импульсов  $ТИ$ . При помощи формирователя начала периодов ФНП из сигнала  $u_{ст}$  формируются импульсы, условно названные «начало четных периодов»  $u_ч$  и «начало нечетных периодов»  $u_{нч}$ . Эти импульсы запу-

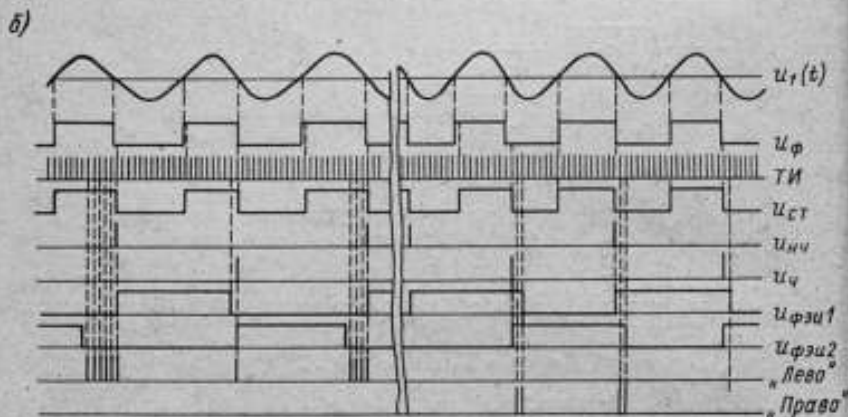
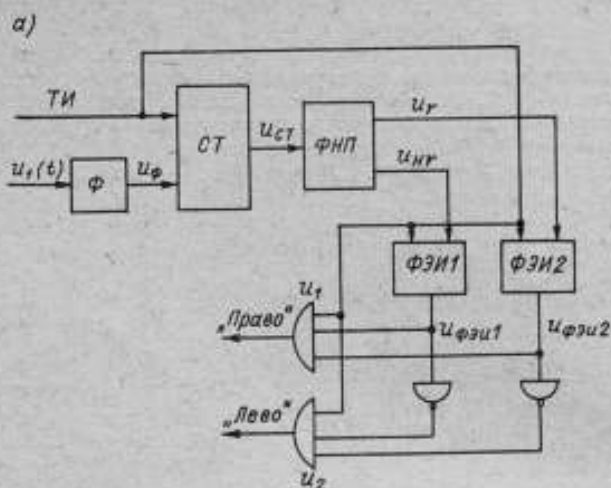


Рис. 5. Структурная схема фазового детектора (а) и временные диаграммы (б) при фазовой интерполяции

скают соответствующие формирователи эталонных интервалов ФЭИ1 и ФЭИ2. Каждый из них представляет собой неперевосный двоичный счетчик с коэффициентом пересчета  $k=16$ , работающий в ждущем режиме.

Начало работы счетчика определяется приходом импульса  $u_{нч}$  ( $u_ч$ ), при этом счетчик отсчитывает 16 тактовых импульсов  $ТИ$ , возвращается в исходное состояние и ожидает приход следующего импульса  $u_{нч}$  ( $u_ч$ ). Время работы счетчика равно периоду несущей частоты — периоду сигналов (3), поскольку генератор  $ГНЧ$  формирует эти сигналы также из сигнала

лов генератора *ТН*. Измерение приращения фазы сигнала (5) производится путем сравнения эталонных интервалов, сформированных *ФЭИ1* и *ФЭИ2*, с периодом сигнала (5). При этом, как видно из рис. 5, б, определяется приращение фазы сигнала (5), происшедшее за время, равное периоду этого сигнала.

Использование одного и того же генератора тактовых импульсов *ГТИ* для выработки сигналов (3) несущей частоты и для отсчета приращения фазы сигнала (5) практически устраняет влияние нестабильности работы *ГТИ* на точность отсчета фазы.

Дискретность отсчета приращения фазы сигнала (5) в описываемом устройстве равна  $\Delta\theta = 2\pi/16$ , что соответствует дискретности отсчета перемещения  $\lambda/32$ .

Счетные импульсы, выработанные блоком *БФСН*, поступают в блок управления реверсивным счетчиком *БУРС*, который управляет направлением счета реверсивного счетчика в зависимости от направления движения и положения каретки и осуществляет коррекцию результатов измерения перемещения при индикации их в метрической системе единиц.

Блок управления реверсивным счетом выполнен таким образом, что при измерении перемещения с дискретностью  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$  и  $\lambda/8$  результат измерения регистрируется в числах импульсов, а при измерении с дискретностью  $\lambda/32$  — в миллиметрах. При этом один импульс, соответствующий перемещению  $\lambda/32$ , регистрируется как 0,02 мкм. Так как истинная цена импульса равна  $\lambda/32 = 0,01975615$  мкм, при отсчете перемещения возникает накопленная погрешность округления. Поскольку округление произведено в сторону увеличения цены импульса, необходимо, чтобы при накоплении ошибки округления до величины  $\lambda/32$  очередной счетный импульс не пропускаться на вход реверсивного счетчика.

Устройство коррекции (рис. 6) содержит реверсивный счетчик импульсов *СИ*, дешифратор *Дш*, управляющий триггер *Тг* и схемы совпадения.

Счетные импульсы поступают на соответствующие входы *СИ* и через схемы совпадения  $u_1$ ,  $u_2$  — на входы реверсивного счетчика *РС*. Состояние дешифруется дешифратором *Дш* так, что при появлении в *СИ* чисел 88, 177, 266, 355, ..., 1245, 1335 на выходе *Дш* появляется логическая «1».

Пусть в начале цикла импульсы поступают по шине «суммирование». В этом случае *Тг* устанавливается в «1». Первые 88 импульсов проходят в *РС* и *СИ*. После 88-го импульса на выходе *Дш* появляется «1», следовательно, на потенциальном входе  $u_1$  через схему  $u_3$  поступает запрещающий потенциал. Следующий 89-й импульс на суммирующий вход *РС* не поступает. Если же следующий импульс придет по шине «вычитание», то он проходит через  $u_2$  на вычитающий вход *РС*. Счетчик *СИ* построен так, что каждым 1337-м импульсом он сбрасывается в «0» и, наоборот, из состояния «0» — первым импульсом, пришедшим на вычитание, устанавливается в состояние «1336». Таким образом, счетчик *СИ* организует цикл коррекции, заключающийся в том, что из каждых 1337 импульсов 15 запрещаются. Номера импульсов, подлежащих запрещению, определяются дешифратором. Все электронные схемы, осуществляющие дискретные преобразования информации, выполнены на импульсно-потенциальной системе элементов, в со-

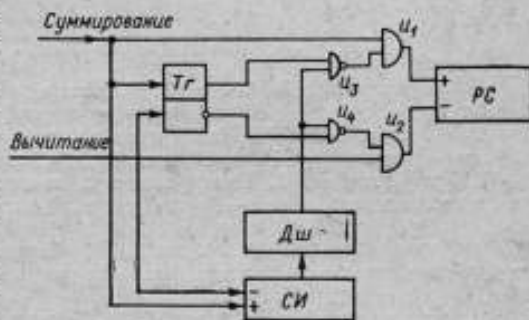


Рис. 6. Схема коррекции реверсивного счетчика импульсов



став которой входят статические триггеры, потенциальные схемы совпадения, инверторы, формователи импульсов.

Перемещение каретки со штриховой мерой от привода *П* осуществляется по программе, задаваемой на пульте управления *БПУ*, предусматривающей величину шага перемещения, количество шагов (после чего каретка начинает обратный ход) число отсчетов на каждой остановке.

Интерференционная установка для измерения шкал счетом полос внедрена в метрологическую практику. Как показали исследования, погрешность однократного измерения интервалов шкалы находится в пределах 0,02—0,10 мкм. Погрешность наведения на штрих по фотоэлектрическому микроскопу не превышает 0,01—0,02 мкм. Стабильность нуля установки при измерении находится в пределах нескольких сотых долей микрометра.

На установке произведена поверка образцовых шкал стереокомпараторов ВНИИМ, ЛОМО и образцовых шкал для поверки отсчетных устройств прецизионных станков и т. д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова Н. В., Цорин В. Г. Интерферометр для измерения перемещений. Авт. свидетельство № 203972, «Бюлл. изобретений», 1967, № 21.
2. Трофимова Н. В. Интерференционный метод измерений шкал до 200 мм.— Труды ВНИИМ, 1961, вып. 47 (107), с. 113—126 с ил.
3. Трофимова Н. В. Интерферометры с плоскими зеркалами для счета интерференционных полос.— Труды метрологических институтов СССР, 1968, вып. 101 (161), с. 48—62 с ил.
4. Бржезинский М. Л., Зорин Д. И., Свердловченко В. Д. Фотометрический фотоэлектрический микроскоп.— Труды институтов Госкомитета, 1965, вып. 78 (138), с. 43—48 с ил.
5. Бржезинский М. Л., Зорин Д. И., Драпкин М. Я., Свердловченко В. Д., Трофимова Н. В., Шестопалов Ю. Н. Измерение шкал интерференционным методом с автоматической регистрацией результатов измерения.— «Измерительная техника», 1970, № 4, с. 58—59 с ил.
6. Преснухин Л. Н., Шаньгин В. Ф., Шаталов Ю. А. Муаровые растровые датчики положения и их применение. «Машиностроение», 1969, 203 с. с ил.
7. Кирьянов В. П., Климатори И. Ф., Щербаченко А. М. Электронное устройство счета и регистрации для лазерного измерителя перемещений.— «Автоматрия», 1971, № 1, с. 21—35 с ил.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.711.51 (083.76) : 351.821

Л. К. Каяк, Л. Ф. Хавинсон,  
О. Ю. Шошина

ВНИИМ

## РЕКОМЕНДАЦИЯ МОЗМ «ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ КОНЦЕВЫЕ МЕРЫ ДЛИНЫ»

Плоскопараллельные концевые меры длины широко используются в промышленности и применяются как для непосредственных измерений линейных размеров, так и в качестве образцовых мер длины разных разрядов точности при поверке средств линейных измерений. Плоскопараллельные концевые меры изготавливают во многих странах мира; с расширением экономических связей между странами становится необходимой унификация технических тре-

бований на эти меры. Для разработки международной рекомендации «Плоско-параллельные концевые меры длины» Международной организацией законодательной метрологии (МОЗМ) была организована международная рабочая группа Д5, в которую вошли СССР (секретариат-докладчик), Бельгия, Венесуэла, Индия, ПНР, Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии, Франция, ФРГ, Швеция и Япония. Проект рекомендации разрабатывался во ВНИИМ, и дважды в Ленинграде проводились совещания рабочей группы Д5 по обсуждению и согласованию проекта\*. В 1973 г. рекомендация была принята Генеральной конференцией.

При разработке проекта были изучены и использованы нормативные документы следующих стран:

Соединенное Королевство — В. S. 888 : 1950; В. S. 1790 : 1961;

Венгрия — MNOSZ 11172-52;

ГДР — TGL 12015-1962;

Польша — PN-60/N-53101;

США — GGG-G-15-1956;

ФРГ — DIN 861-1959;

Япония — JISB 7506-1961;

СССР — ГОСТ 9038—59 (в настоящее время ГОСТ 9038—73)

Франция — каталог фирмы РМ;

Швеция — каталог фирмы «Иогансон»;

НРБ — инструкция по поверке концевых мер;

СССР — инструкции 100—60 и 96—65, а также международные доку-

менты: рекомендации СЭВ по стандартизации PC-2276-69 и PC-3769; проекты рекомендации ИСО/ТКЗ/ПКЗ/РГ2 (Берлин-3) 18Е, ноябрь, 1969.

В указанных документах приняты разные определения одних и тех же терминов, установлено разное число классов точности мер, которые характеризуются по разным параметрам и т. д.

На практике применяют два определения самого термина «длина концевой меры». Длина концевой меры в одном случае, применительно к интерференционному методу измерения, определяется как длина перпендикуляра, опущенного из точки одной измерительной поверхности на поверхность вспомогательной пластины, к которой мера притерта другой своей измерительной поверхностью (В. S. 888 : 1950; В. S. 1790 : 1961; DIN 861-1959; JISB 7506-1961; MNOSZ 11172—52; PN-60/N-53101; TGL 12015-1962). Во втором случае — как длина перпендикуляра, опущенного из точки одной измерительной поверхности на другую измерительную поверхность (PC 2267—69; GGG-G-15—1956; ГОСТ 9038—59), т. е. независимо от методики, которая применяется для измерения длины меры. Размеры одной и той же концевой меры в зависимости от ее определения могут различаться в пределах до нескольких сотых долей микрометра, так как в одном случае это будет расстояние между измерительными поверхностями меры, а в другом — между оптическими плоскостями, от которых происходит отражение света при интерференционном измерении ее длины.

В реальных условиях измерительные поверхности меры выполнены с некоторым отклонением от плоскостности и взаимной параллельности, и поэтому длина меры может быть измерена с погрешностью в пределах отклонения от плоскопараллельности. При измерении длины меры и применении их при поверке приборов (в большинстве случаев контактными методами) важно знать, относительно какой точки на измерительной поверхности был определен размер меры при ее аттестации. Поэтому должно быть установлено более опре-

\* В рабочей группе Д5 МОЗМ при согласовании проектов рекомендаций принимали активное участие следующие специалисты: Б. Атане (Франция), Ф. Байер-Хельмс, К. Доренвендт (ФРГ), З. Выжиковска, А. Жабчиньски (ПНР), В. Дженнингс (Соединенное Королевство), В. Фостер и Б. Эденхольм (представители ИСО/ТКЗ/ПКЗ), а также Г. Д. Бурдун, Ю. П. Ефремов, А. З. Полкова, А. М. Смогоржевский, В. Я. Эйдинов (СССР).

делено, что понимается под длиной меры. В метрологической практике пользуются, в основном, центром измерительной поверхности. В рассмотренных нормативных документах по этому вопросу также имеются расхождения. При разделении мер на классы точности некоторые стандарты в качестве характерной точки на измерительной поверхности используют точку, соответствующую наибольшему отклонению от номинальной длины меры.

Классы точности определяются, в основном, двумя параметрами: отклонением действительной длины меры от номинальной и отклонением от плоскопараллельности. Эти параметры в различных документах определены по-разному. В B.S.888:1950, B.S.1790:1961, MNOSZ11172-52, PN-60/N-53101, ГОСТ 9038-59 отклонение длины меры от номинальной принимается равным разности между серединой и номинальной длинами, а в DIN861-1959, JISB7506-1961, TGL12015-1962 это отклонение определяется как разность между длиной меры в любой точке и номинальной. Неплоскопараллельность по ГОСТ 9038-59, DIN861-1959, TGL12015-1962 и PN-60/N-53101 определяется как наибольшая по абсолютной величине разность между длиной меры в любой точке и серединой длиной (эта разность берется со знаком «±»), а по B.S.888:1950, B.S.1790:1961 и JISB7506-1961 — как разность между максимальной и минимальной длиной концевой меры. Даже при установлении одних и тех же параметров при построении классов точности принимается разное количество классов и различные пределы допускаемых отклонений от номинальной длины и от плоскопараллельности, например, в ГОСТ 9038-59 и PN-60/N-53101.

В табл. 1 представлены формулы допускаемых отклонений от номинальной длины ( $L$  — длина меры в метрах). Коэффициенты перехода от класса к классу для допускаемых отклонений длины меры от номинальной, вычисленные для разных стандартов, лежат в пределах 1,8—2,0, а для допускаемых отклонений по плоскопараллельности — от 1,5—1,8. Измерительные поверхности мер в B.S.888-1950 характеризуются также отклонением от плоскостности. Термин «отклонение от плоскостности» определяется здесь минимальным расстоянием между двумя минимальными параллельными плоскостями, между которыми заключена измерительная поверхность.

Требования к притираемости измерительных поверхностей мер устанавливаются во всех рассмотренных документах, однако наиболее жесткие требования установлены в ГОСТ 9038-59 и PN-60/N-53101, а именно: меры высших классов точности должны притираться к вспомогательным пластинам без серых пятен и оттонок. Кроме того, в ГОСТ 9038-59 нормируется значение усилия, необходимого при сдвиге одной измерительной поверхности относительно другой.

Одним из важных параметров, влияющих на точность мер, является стабильность их длины во времени. Однако единой точки зрения по этому вопросу в рассмотренных стандартах нет. Согласно ГОСТ 9038-59, MNOSZ11172-52 и PN-60/N-53101 считается целесообразным установить численные значения допускаемых изменений длины концевых мер на 1 м длины в течение 12 месяцев (см. табл. 2).

В английском стандарте на концевые меры круглого сечения B.S.1790:1961 дается рекомендация по термообработке материала концевых мер. В других же документах (GGG-G-15-1956, B.S.888:1950, JISB7506-1961) указывается лишь на то, что материал концевых мер должен быть высокого качества и проходить необходимую термообработку для стабилизации длины.

Температурный коэффициент удлинения  $\alpha$  концевых мер из стали в MNOSZ11172-52, DIN861-1959 и TGL12015-1962 установлен равным  $(11,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, а по ГОСТ 9038-59, PN-60/N-53101 и JISB7506-1961 равным  $(11,5 \pm 1) \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, т. е. с уменьшенными пределами изменения. В стандарте США GGG-G-15-1956 для коэффициента  $\alpha$  устанавливается только одно значение  $11,5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>.

Самые высокие требования по твердости измерительных поверхностей стальных концевых мер (не ниже 65HRC) установлены в GGG-G-15-1956; японский документ JISB7506-1961 устанавливает значение 750—800 HV; тре-

Формулы допускаемых отклонений, от номинальной длины мер (в мм)

Нормативный документ	Класс точности				
	0	1	2	3	4
В. S. 888:1950	$\pm (0,05 + 1,5 L)$	$\pm (0,12 + 4 L)$	$\begin{matrix} + (0,2+3 L); \\ - (0,1+1,5 L); \end{matrix}$	$\begin{matrix} + (0,25+7,5 L); \\ - (0,1+4 L) \end{matrix}$	—
В. S. 1790:1961	$\pm (0,08+2 L)$	$\pm (0,15+5 L)$	$\begin{matrix} + (0,18+7 L); \\ - (0,18+3 L); \end{matrix}$	$\begin{matrix} + (0,3+10 L); \\ - (0,3+5 L); \end{matrix}$	—
TGL 12015:1962	$\pm (0,1+2 L)$	$\pm (0,2+5 L)$	$\pm (0,5+10 L)$	$\pm (1,0+20 L)$	—
ГОСТ 9038-59	$\pm (0,1+2 L)$	$\pm (0,2+4 L)$	$\pm (0,4+6 L)$	$\pm (0,8+10 L)$	—
GGG-G-15-1956	$\pm (0,05+2 L)$	$\begin{matrix} + (0,15+6 L) \\ + (0,05+2 L) \end{matrix}$	$\begin{matrix} \pm (0,25+10 L) \\ - (0,15+6 L) \end{matrix}$	—	—
JISB 7506-1961	Только до 100 м $\pm (0,05+1,5 L)$	$\pm (0,1+4 L)$	$\pm (0,2+8 L)$	$\pm (0,4+16 L)$	—
MNOSZ 11172-52	$\pm (0,1+2 L)$	$\pm (0,2+4 L)$	$\pm (0,5+5 L)$	$\pm (1,0+10 L)$	$\pm (2,0+0,014 L)$
PN-60/M-53101	—	До 25 мм $\pm 0,10$ ; свыше 25 мм $\pm 4$	$\begin{matrix} \pm 0,20 \\ \pm 8 \end{matrix}$	До 10 мм $+0,60$ ; 10–25 мм $\pm 0,70$ ; свыше 25 мм $\pm (0,5+8 L)$	—
PC 2276-69	$\pm (0,05+1 L)$	$\pm (0,1+1,9 L)$	$\pm (0,2+3,8 L)$	$\pm (0,4+7,6 L)$	$\pm (0,8+15,2 L)$

бования остальных документов совпадают — нижняя граница твердости установлена 62 HRC.

Международная рекомендация МОЗМ, по мнению авторов, должна исходить из имеющихся в разных странах нормативных документов, учитывать лучший опыт изготовления и применения концевых мер в метрологической практике и промышленности. Нормы точности, устанавливаемые в рекомендации МОЗМ, должны быть более строгими и не ниже достигнутого некоторыми фирмами уровня точности при условии экономической целесообразности.

Рекомендация МОЗМ «Плоскопараллельные концевые меры длины» № 31 соответствует типовой структуре рекомендаций МОЗМ. По содержанию она несколько отличается тем, что кроме обычных разделов по терминологии, назначению концевых мер, техническим требованиям к их изготовлению, включает также разделы, определяющие метрологические качества мер, методы и точность их поверки, ибо плоскопараллельные концевые меры длины служат в качестве образцовых мер различных степеней точности.

Таблица 2

Допускаемые изменения длины концевых мер на 1 м длины в течение 12 месяцев, мкм

Класс точности	ГОСТ 9038-59	PN-60/M-53101	MNOSZ 11172-52
0	0,5	—	1,5
1	1,0	1,5	3,0
2	2,0	1,5	3,0
3	2,0	3,0	3,0
4	—	—	3,0

В данной рекомендации установлены также требования не только к изготовлению концевых мер, но и к концевым мерам длины, находящимся в эксплуатации. Рабочая группа признала полезным предложение секретариата о включении в рекомендацию терминов на французском языке и их эквивалентов на русском, английском, немецком и испанском языках.

В рекомендации определены основные термины: длина концевой меры в любой точке, срединная длина, отклонение от плоскопараллельности концевой меры, отклонение длины меры от номинальной, отклонение от плоскостности и притираемость концевой меры.

Длина концевой меры принята как длина перпендикуляра, опущенного из точки одной из измерительных поверхностей на противоположную поверхность. Такое определение соответствует условиям применения концевых мер на практике и позволяет установить требования к точности изготовления мер независимо от методики измерения их длины при контроле. Однако в связи с тем, что при аттестации наиболее точных концевых мер абсолютным интерференционным методом их притирают к вспомогательной пластине, в примечании указывается, что в этом случае противоположной измерительной поверхностью служит поверхность плоской вспомогательной пластины, к которой притерта концевая мера; рекомендуется, чтобы вспомогательная пластина была изготовлена из того же материала, что и мера, и имела то же качество измерительной поверхности. Это определение правильно также и потому, что на практике уже применяют бесконтактные интерференционные методы измерения.

В рекомендации № 30 устанавливается пять классов точности: AA, A, B, C и D в зависимости от величины допускаемых отклонений длины меры в любой точке от номинальной длины и отклонений от плоскопараллельности. Нормирование по «отклонению длины меры в любой точке от номинальной» более строгое, чем по «отклонению срединной длины», так как только в одной точке отклонение длины меры от номинала может достигать допускаемой ве-



длина. Отклонение во всех других точках будет меньше допуска. Когда допуск нормируется для средней длины меры, длина меры в других точках может быть больше или меньше средней в пределах допуска на отклонение от плоскопараллельности.

Значения допускаемых отклонений (в микрометрах) от номинальной длины в проекте рекомендации рассчитывались по формулам точности:

для концевых мер	кл. АА	$(0,05+1 L)$ ;
» » »	кл. А	$(0,1+2 L)$ ;
» » »	кл. В	$(0,2+4 L)$ ;
» » »	кл. С	$(0,4+8 L)$ ;
» » »	кл. D	$(0,8+16 L)$ ;

здесь  $L$  — длина меры (в метрах).

Отклонение от плоскопараллельности концевой меры определяется разностью между ее наибольшей и наименьшей длинами, т. е. является изменением размера меры, обусловленным неплоскостью и непараллельностью измерительных поверхностей. Такое определение параметра отличается от ранее принятого ГОСТ 9038—59 тем, что устанавливает требования на всю зону допуска и непосредственно характеризует точность изготовления концевых мер.

В рекомендации МОЗМ № 30 нормируются также и допускаемые отклонения от плоскостности измерительных поверхностей, которое определяется как расстояние между двумя ближайшими параллельными плоскостями, включающими измерительную поверхность.

«Отклонение от плоскостности измерительных поверхностей» и «притираемость концевых мер» характеризуют качество выполнения измерительных поверхностей. Все рассмотренные стандарты (кроме В.С.888 : 1950) нормируют один из этих параметров, а именно: «притираемость». В рекомендации включены оба эти параметра и установлены допуски на них; это позволит контролировать отклонение от плоскостности измерительных поверхностей, не притирая концевые меры к вспомогательным пластинам. Допускаемые значения отклонений от плоскостности приведены в табл. 3.

Таблица 3

Допускаемые отклонения  
от плоскостности измерительных поверхностей, мкм

Номинальная длина, мм	Классы точности			
	АА	А	В	С и D
До 150	0,05	0,10	0,15	0,25
Более 150; до 500	0,10	0,15	0,18	0,25
Более 500; до 1000	0,15	0,18	0,20	0,25

Требования к притираемости измерительных поверхностей концевых мер нормируются только по наблюдаемой при притирании мер к стеклянной пластине интерференционной картине. Из-за отсутствия приборов для измерений усилий сдвига этот критерий качества мер не включен. Требования к притираемости концевых мер классов точности АА и А совпадают с требованиями к притираемости концевых мер класса точности 0 по ГОСТ 9038-59; для концевых мер классов точности В, С и D проекта рекомендации эти требования совпадают с требованиями для мер классов 1, 2 и 3 по ГОСТ 9038-59.

Временная стабильность длины концевых мер в рекомендации МОЗМ нормируется в зависимости от длины концевой меры, а также от класса точности. Для мер наивысшего класса точности АА изменение длины концевых мер за 1 год не должно превышать значений  $(0,02+0,2 L)$  мкм; для мер класса

точности А это изменение не должно превышать  $(0,02+0,5 L)$  мкм, а для концевых мер классов точности В, С и D требования к стабильности их длины устанавливаются одинаковые и изменение их длины за один год не должно превышать  $(0,05+1,0 L)$  мкм. При этом исходят из того, что изменение длины концевой меры за год не должно превышать, по крайней мере, половины допуска на изготовление, т. е. надежность по классу — 2 года. Для образцовых концевых мер нестабильность длины не должна превышать допускаемой погрешности их аттестации. При разработке ГОСТ 9038-73 введены также ужесточенные технические требования, соответствующие РС 2267-69 СЭВ и рекомендации МОЗМ № 30.

Ввиду того что плоскопараллельные концевые меры длины служат в качестве образцовых мер различных степеней точности, для передачи размера единицы длины от эталонов до рабочих концевых мер длины и приборов, в рекомендацию включен раздел «Назначение и условия поверки концевых мер», содержащий основные метрологические требования для концевых мер: условия и точность измерения их длины при аттестации, назначение мер по поверочной схеме. Это является основным отличием данной рекомендации от других нормативных документов, устанавливающих обычно только нормы на изготовление мер.

Рекомендация МОЗМ № 30 содержит пять разрядов образцовых концевых мер со следующими пределами допускаемых погрешностей измерения их длины:

для мер 1-го разряда	$\pm (0,02+0,2 L)$ мкм;
» » 2-го »	$\pm (0,05+0,5 L)$ мкм;
» » 3-го »	$\pm (0,10+1,0 L)$ мкм;
» » 4-го »	$\pm (0,20+2,0 L)$ мкм;
» » 5-го »	$\pm (0,50+5,0 L)$ мкм.

Столь значительное повышение точности образцовых мер 1-го разряда обусловлено необходимостью удовлетворить возросшие требования промышленности. Возможность реализации такой точности обеспечена наличием соответствующих методик измерений и образцовых приборов.

В новой поверочной схеме для средств измерений длины (ГОСТ 8.020-75) формулы допускаемых погрешностей методов поверки соответствуют формулам рекомендации МОЗМ.

Рекомендация МОЗМ № 30 согласована практически по всем основным параметрам с РС 2267-69 СЭВ и проектом рекомендации ИСО/ТКЗ/ПКЗ/РГ2 (Берлин-3).

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.711.5.088

Л. Ф. Хавинсон,

ВНИИМ

### О ПОГРЕШНОСТЯХ АБСОЛЮТНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ КОНЦЕВЫХ МЕР

В настоящее время требования к точности измерений длины концевых мер таковы, что погрешности, вызываемые неопределенностью толщины притирочного слоя и скачка фазы на поверхности концевых мер, сопоставимы с погрешностью абсолютных измерений. Это относится, в первую очередь, к концевым мерам 1-го разряда малой длины (до 100 мм), для которых в ГОСТ 8.020—75 установлена формула погрешности аттестации  $\pm (0,02 \pm 0,2 L)$  мкм, ( $L$  — длина меры в метрах).

Указанные погрешности вызваны тем, что при абсолютных интерференционных измерениях длины в качестве одной из измерительных поверхностей

концевой меры используется поверхность вспомогательной пластины, к которой мера притерта.

Исследованием притираемости, влияния сил сцепления на размер концевых мер, а также определением толщины притирочного слоя занимались многие авторы [1—7]. Накоплен большой теоретический и фактический материал, однако экспериментальные данные различных авторов противоречивы и не позволяют делать определенных выводов относительно толщины притирочного слоя. Так, по данным работы [6] эта величина лежит в пределах 0,005—0,025 мкм; по данным [7] — 0,15±0,20 мкм.

Если считать большую часть результатов достоверными, то остается невыясненным вопрос о факторах, влияющих на толщину притирочного слоя.

При абсолютных интерференционных измерениях длины малых концевых мер в метрологической практике используют вспомогательные пластины из стекла или плавленого кварца. Эти пластины удобны тем, что позволяют легко контролировать качество притирки мер. Однако ввиду того, что материал меры и пластины разный, в результате измерений длины вносится погрешность из-за различий скачков фазы при отражении света на поверхностях меры и пластины. Значение скачка фазы, зависящее от оптических постоянных материала концевых мер и характера доводки измерительных поверхностей, для мер разных фирм лежит в пределах от -0,002 до +0,08 мкм [8, 9]. Кроме того, по данным Австралийской Национальной лаборатории эталонов даже в пределах одного набора концевых мер разброс значений скачка фазы составляет 0,03 мкм. Таким образом, введение в результат измерений длины некоторой средней поправки для всех мер сразу ограничивает точность измерений величиной этого разброса.

В лаборатории эталонов длины ВНИИМ ведутся работы по исследованию толщины притирочного слоя между концевыми мерами и плоскими стеклянными пластинами и определению скачка фазы для отечественных концевых мер длины из твердого сплава [10] и из стали.

Толщина притирочного слоя для стальных концевых мер класса точности 0 завода «Красный инструментальщик» (г. Киров) определялась по смещению интерференционных полос, наблюдаемых через вспомогательную пластину [11] по формуле

$$t = \left( A \frac{\lambda}{2} - \frac{\delta}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4} \right) \frac{1}{n}, \quad (1)$$

где  $A$  — смещение интерференционных полос;  $\delta$  — скачок фазы, зависящий от оптических постоянных металла;  $n$  — коэффициент преломления притирочного слоя.

Толщина притирочного слоя для этих мер получена в пределах 0,012—0,025 мкм.

Для определения поправки на относительный скачок фазы  $\frac{\delta\lambda}{4\pi}$  на часть поверхности пластины и притертой к ней меры испарением в вакууме нанеслось алюминиевое покрытие. Толщина покрытия на поверхности меры

$$h = A_1 \frac{\lambda}{2} + \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} - \frac{\pi + \delta}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $A_1$  — взаимное смещение полос на поверхностях меры и покрытия на ней;  $\sigma$  — скачок фазы при отражении от поверхности покрытия.

По аналогии с (2) толщина покрытия на поверхности пластины будет

$$h = A_2 \frac{\lambda}{2} + \frac{\sigma}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (3)$$

где  $A_2$  — взаимное смещение полос на поверхностях пластины и покрытия на ней;  $\alpha = \pi$  — скачок фазы при отражении от поверхности стеклянной пластины.

Из выражений (2) и (3) получим рабочую формулу для определения поправки на разнородность материала меры и пластины

$$\frac{\delta\lambda}{4\lambda} = (A_2 - A_1) \frac{\lambda}{2}$$

К покрытию предъявлялись следующие требования:

1) разность толщин покрытий на поверхностях меры и пластины, вызванная разным удалением этих поверхностей от испарителя, должна быть пренебрежимо мала по сравнению с ожидаемым значением поправки  $\frac{\delta\lambda}{4\lambda}$ ; как

показывает расчет, для условий напыления, использованных в настоящей работе, при толщинах покрытий до 100 нм указанная разность не превосходит 0,002 мкм;

2) толщина покрытия должна быть достаточно большой, чтобы структура подложки не сказывалась на его оптических свойствах.

Исследованием установлено, что оптимальной толщиной покрытия, удовлетворяющего этим двум требованиям, является толщина не менее 50–80 нм. Значения поправки на разнородность материала меры и пластины для исследуемых мер находятся в пределах 0,029–0,044 мкм. Среднее квадратическое отклонение результата измерений поправки не превышает 0,006 мкм.

Для повышения точности измерений длины концевых мер до 0,01 мкм необходимо в результат измерений вводить поправки на толщину притирочного слоя и скачок фазы, которые следует определять в каждом конкретном случае по специальной методике [9, 10].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bruce C. F., Thornton B. S. Adhesion and Contact Error in Length Metrology.— "App. Physics", v. 27, N 8, 1956, p. 854–859.
2. Соловьев В. А. Притираемость плоскопараллельных концевых мер длины.— «Измерительная техника», 1960, № 4, с. 1–4.
3. Кайнер Г. Б., Кулаков А. И. О притиремости доведенных поверхностей.— «Измерительная техника», 1972, № 11, с. 76–77.
4. Сасада Ююко. Колебания погрешностей при притирке концевых мер к оптическим пластинам.— «Кэйре кэнкюсю хококу», 1972, 21, № 1, с. 1–11.
5. Като Такаши. Связь между силой сцепления и размером концевой меры.— «Сэйинцу кикай», 1973, 39, № 4, с. 455–457.
6. Романова М. Ф. Измерение длины концевых мер с помощью световых волн. Автореф. дисс., ВНИИМ, Л., 1945.
7. Цумура Кийон, Фуйин Ясухару. Исследование притираемости концевых мер.— «Сэйинцу Кикай», 1972, 38, № 2, с. 155–160.
8. Кияшко А. М. О поправке на притирку при интерференционном методе измерений.— «Метрология и поверочное дело», 1939, № 9, с. 18–19.
9. Луизов А. В. Разработка нового метода определения скачка фазы при отражении света от поверхности металла.— Уч. записки ЛГУ, Серия физических наук, 1940, вып. 6, с. 37.
10. Ефремов Ю. П., Хавинсон Л. Ф. Определение поправки на разнородность материала концевых мер длины из твердого сплава и вспомогательной пластины.— «Измерительная техника», 1972, № 9, 19–20.
11. Хавинсон Л. Ф. Определение толщины притирочного слоя между концевой мерой из твердого сплава и стеклянной вспомогательной пластиной.— «Измерительная техника», 1974, № 1, с. 23.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ КОМПАРАТОРЕ ФЭК-1000

Компаратор ФЭК-1000 служит для проверки образцовых штриховых мер длины 1-го разряда (ГОСТ 8.020-75) и мер 0, 1, 2 и 3 классов точности, применяемых в точном станкостроении и приборостроении [1, 2].

Фотоэлектрические автоматические компараторы для проверки штриховых мер длины стали применяться сравнительно недавно. Оценка составляющих погрешностей измерений на компараторе ФЭК-1000 позволила определить не только суммарную погрешность результатов измерений на этом компараторе, но и установить их характер и допустимые пределы влияния различных факторов на точность измерений.

В суммарную погрешность  $\delta L$  проверки штриховых мер на компараторе ФЭК-1000 входят:

- 1) погрешность длины исходной эталонной или образцовой штриховой меры  $\Delta_N$ ;
  - 2) температурная погрешность измерений  $\Delta_t$ , обусловленная неточным значением температурных коэффициентов линейного расширения и погрешности измерения температуры сравниваемых мер;
  - 3) погрешность измерения разности длин сравниваемых мер  $\delta \Delta l$ .
- Следовательно, суммарная погрешность

$$\delta L = \sqrt{\Delta_N^2 + \Delta_t^2 + \delta \Delta l^2}. \quad (1)$$

Как показал анализ, погрешность  $\Delta \Delta l$  состоит из нескольких составляющих погрешностей и может быть определена из следующего выражения

$$\Delta \Delta l = \Delta l \sqrt{\left[ \frac{\Delta l_2 - l_1}{l_2 - l_1} \right]^2 + 2 \left[ \frac{\Delta_N}{N} \right]}. \quad (2)$$

Погрешность  $\Delta \Delta l$  зависит от величины измеряемой разности длин  $\Delta l$ , погрешности длины исходной меры  $\Delta l_{i-1}$ , применявшейся при определении постоянной компаратора и от погрешности определения числа импульсов  $\Delta_N$ . Так как погрешность  $\Delta_N = \Delta \tau f$  (где  $\Delta \tau$  — погрешность измерения временного интервала  $\tau$ ,  $f$  — частота заполнения, равная 100 кГц), то определение погрешности  $\Delta_N$  сводится к погрешности измерения временного интервала  $\tau$ . Эта погрешность включает в себя погрешности из-за шумов (естественную нестабильность временного интервала) и погрешность вследствие нестабильности амплитуды и частоты сканирования изображений штрихов (техническая нестабильность временного интервала).

Экспериментальная проверка зависимости погрешности измерения  $\tau$  от шумов при изменении отношения сигнал/шум подтверждает обратно пропорциональную функциональную зависимость. Среднее квадратическое отклонение результата измерения временного интервала  $\tau$  вследствие шума составляет  $S_{\tau} = 0,54$  мкс, что хорошо согласуется с данными теоретического анализа погрешности измерения временных интервалов  $\tau$  на компараторе. Техническая нестабильность  $\tau$  может быть вычислена по формуле [3]

$$\Delta \tau_{\text{н.а.}} = \sqrt{\left[ \frac{1}{2\pi f_n} \arcsin \frac{\Delta IV}{A} \Delta f_n \right]^2 + \left[ \frac{1}{2\pi f_n} \frac{\Delta IV}{A^2} \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{\Delta IV}{A} \right)^2}} \Delta A \right]^2} \quad (3)$$

где  $V$  — линейное увеличение оптических каналов;  $A$  и  $f_n$  — амплитуда и частота сканирования изображений штрихов.



Принимая  $f_s = 50$  Гц,  $V = 10^3$ ,  $\Delta l = 10$  мкм,  $A = 0,5$  мм и считая, что изменения основной частоты и амплитуды сканирования изображений штрихов находятся в пределах 0,1 и 2%, получаем техническую нестабильность  $\Delta t_{в.А} = \pm 1 \cdot 10^{-5}$  с.

Суммарная погрешность измерения  $t$  электронным измерительным устройством равна  $\pm 11 \cdot 10^{-6}$  с. Поскольку в измерительном устройстве автоматически производится многократное измерение временных интервалов при прямом и обратном ходе за 100 периодов колебаний зеркала, то погрешность результата измерения будет не более  $\delta_N = \pm 0,11$  имп.

Приняв в выражении (2)  $\delta_{l_2-l_1} = \pm 0,05$  мкм,  $l_2 - l_1 = 10$  мкм,  $\Delta_N = \pm 0,11$  имп и  $N = 60$  имп, получаем  $\Delta_{\Delta l} = \pm 0,06$  мкм.

Неравенство амплитуд сканирования изображений штрихов или различие увеличений каналов микроскопов приводит к погрешности, которая зависит от точности остановки стола с мерами и по данным экспериментов составляет  $\pm 0,012$  мкм.

Погрешность от нелинейности рабочего участка амплитуды сканирования, определенная при  $\frac{A}{V} = 50$  мкм,  $\Delta l = 10$  мкм, будет 0,05 мкм. При проверке штриховых мер класса точности 0 или 1 (ГОСТ 12069—66) измеряемые разности длин не будут больше 5 мкм, и поэтому эта погрешность составит не более 0,01 мкм.

При оценке погрешности измерений от расфокусировки сравниваемых мер установлено, что она зависит от угла наклона осей оптических каналов двойного фотоэлектрического микроскопа к линии измерения, а также от точности установки сравниваемых мер по уровню и непрямолинейности перемещения стола компаратора. Расфокусировка может достигать 40 мкм. Максимальная погрешность, возникающая от расфокусировки по обоим оптическим каналам, составит  $\pm 0,024$  мкм.

Исследование влияния на точность измерений изменений амплитуды импульсов вследствие различного качества штрихов показало, что при предельном изменении амплитуды до 60% погрешность достигает 0,5 мкм. При изменении амплитуды до 40% погрешность определяется, в основном, изменением отношения сигнал/шум. Так как обычно происходит уменьшение амплитуды импульсов, то сначала уровень ограничения устанавливается равным 0,5 и имп, что допускает изменения амплитуды импульсов в сторону уменьшения до 25% и в сторону увеличения до 15%.

Анализ погрешностей, вызываемых деформациями сравниваемых мер, и расчет прогибов шкаловой поверхности для основных типов штриховых мер (ГОСТ 12069—66) свидетельствуют о безусловной необходимости для точных штриховых мер наносить шкалу штрихов на нейтральной плоскости. В этом случае, как показали эксперименты, способ установки сравниваемых мер на точках опоры или на плоскости практически не влияет на точность измерений.

Суммарная погрешность измерения разностей длин, вычисленная по частным составляющим для приведенных ранее данных, будет равна  $\Delta_{\Delta l} = \pm 0,07$  мкм.

Результаты расчетов подтверждают высокую точность измерений на компараторе ФЭК-1000 и указывают на реальную возможность дальнейшего уменьшения погрешности. С уменьшением погрешности измерения разностей длин температурные погрешности станут наибольшими. Погрешность измерения температуры дифференциальными термометрами включает: погрешность измерения температуры свободных спаев термопар  $\delta_1 = \pm 0,002^\circ\text{C}$ ; погрешность градуировки термопар  $\delta_2 = \pm 0,002^\circ\text{C}$ ; погрешность отсчетов по шкале гальванометра  $\delta_3 = \pm 0,003^\circ\text{C}$ .

Суммарная погрешность измерения температуры мер  $\delta_t = \pm 0,004^\circ\text{C}$ . Погрешность температурного коэффициента удлинения  $\delta_{\alpha'_{LR}}$  составляет  $\pm 0,03 \cdot 10^{-4}$  град $^{-1}$ .

При сравнении штриховых мер длиной 1 м с  $\alpha'_{LR} = 11,5 \cdot 10^{-4}$  град $^{-1}$  наибольшая суммарная температурная погрешность будет  $\Delta_t = \pm 0,07$  мкм.

Отклонения реальной характеристики изменения температуры от ее линейной аппроксимации при нестабильном температурном режиме вызывают остаточную температурную погрешность и обуславливают целесообразность применения симметричного приема измерений.

Анализ и расчеты дали следующие соответствующие погрешности измерений: погрешность измерения разности длин  $\Delta L_1 = \pm 0,07$  мкм, температурная погрешность  $\Delta L_2 = \pm 0,07$  мкм.

Исходная штриховая мера компаратора ФЭК-1000 соответствует по точности рабочим эталонам длины, среднее квадратическое отклонение погрешности поверки которых в поверочной схеме принято  $S_R = \pm (0,02 + 0,04)$  мкм. Суммарная доверительная погрешность поверки образцовых мер из стали на компараторе при доверительной вероятности 0,98  $\delta L = \pm 0,26$  мкм. При сличении инварных штриховых мер с  $\alpha' = 1 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ,  $\delta L = \pm 0,18$  мкм. Полученную суммарную погрешность можно считать доверительной погрешностью измерения длины штриховых мер на компараторе ФЭК-1000 (при доверительной вероятности 0,99), поскольку составляющие погрешности вычислены для предельных отклонений условий измерений.

Погрешность измерения разностей длин возможно уменьшить до  $\Delta L_1 = \pm 0,04$  мкм за счет уменьшения погрешности определения постоянной компаратора до  $\Delta L_{2-1} = \pm 0,03$  мкм и уменьшения измеряемых разностей длин до 5 мкм. Последнее позволит уменьшить погрешность вследствие неравномерности скорости сканирования до 0,01 мкм. Уменьшение температурной погрешности до  $\pm 0,03$  мкм осуществимо путем уменьшения погрешности измерения температуры сравниваемых мер до  $\pm 0,002^\circ \text{C}$  и уменьшения допустимого отклонения температуры измерения от нормальной до  $\pm 0,1^\circ \text{C}$ .

Следовательно, на компараторе ФЭК-1000 можно поверять подразделения шкал рабочих эталонов длины. Результаты измерений на компараторе ФЭК-1000 определяют по двум сериям наблюдений, состоящих не менее чем из двух приемов измерений. В прямом и обратном направлении одна серия измерений отличается от другой расположением сравниваемых мер относительно

Таблица 1

Интервал, мм	Разности длин интервалов мер, мкм			Сумма
	$\Delta L_1$ № 006— № 0028	$\Delta L_1$ № 0028— № 0022	$\Delta L_2$ № 0022— № 006	
800—810	+0,12	+0,02	-0,02	+0,12
800—820	+0,08	+0,16	-0,14	+0,10
800—830	-0,06	+0,06	+0,06	+0,06
800—840	+0,16	+0,02	-0,11	+0,07
800—850	-0,06	+0,10	+0,13	+0,17
800—860	+0,04	+0,04	-0,04	+0,04
800—870	-0,11	+0,10	+0,14	+0,13
800—880	+0,12	+0,09	+0,02	+0,23
800—890	-0,06	+0,12	+0,10	+0,16
800—900	+0,20	+0,15	-0,17	+0,18
800—910	+0,08	+0,10	-0,10	+0,08
800—920	-0,10	-0,08	+0,24	+0,06
800—930	-0,10	+0,09	+0,14	+0,13
800—940	-0,05	-0,04	+0,26	+0,17
800—950	+0,01	+0,02	+0,22	+0,25
800—960	-0,02	-0,12	+0,44	+0,30
800—970	-0,16	-0,14	+0,41	+0,11
800—980	-0,20	-0,28	+0,66	+0,18
800—990	-0,16	-0,28	+0,58	+0,14
800—1000	+0,03	-0,26	+0,53	+0,15

микроскопа:  $L(0-100)$ ,  $R(0-100)$  и  $L(100-0)$ ,  $R(100-0)$ . Такая методика позволяет исключить систематические погрешности, вызываемые асимметрией профиля штрихов, изгибом шкаловой поверхности и изменениями освещения. Расхождения между результатами измерения в двух положениях штриховых мер колеблются для различных штриховых мер от 0,1 до 0,5 мкм.

При исследовании компаратора ФЭК-1000 оценка погрешности результатов произведена по многократным измерениям, характеризующим внутреннюю сходимость результатов измерений, а также путем сравнения полученных результатов с результатами сличений тех же мер другими методами.

Среднее квадратическое отклонение результата измерения разностей длин, вычисленное по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum \delta^2}{3n}}$$

Таблица 2

Рабочий эталон	Действительная длина мер при температуре 20°C	
	Опτικο-механический компаратор	ФЭК-1000
Мера № 564: 1-е положение 2-е     »  Среднее . . .	1 м—15,56 мкм	1 м—15,43 мкм
	1 м—15,60 мкм	1 м—15,56 мкм
	1 м—15,58 мкм	1 м—15,50 мкм
Мера № 566: 1-е положение 2-е     »  Среднее . . .	1 м+3,30 мкм	1 м+3,35 мкм
	1 м+3,76 мкм	1 м+3,27 мкм
	1 м+3,53 мкм	1 м+3,41 мкм
Мера № 567: 1-е положение 2-е     »  Среднее . . .	1 м+0,52 мкм	1 м+0,44 мкм
	1 м+0,24 мкм	1 м+0,65 мкм
	1 м+0,38 мкм	1 м+0,54 мкм
Мера № 568: 1-е положение 2-е     »  Среднее . . .	1 м+13,34 мкм	1 м+13,54 мкм
	1 м+13,24 мкм	1 м+13,52 мкм
	1 м+13,29 мкм	1 м+13,53 мкм
Мера № 611: 1-е положение 2-е     »  Среднее . . .	1 м+6,90 мкм	1 м+7,25 мкм
	1 м+7,23 мкм	1 м+6,96 мкм
	1 м+7,06 мкм	1 м+7,10 мкм
Мера № 006: 1-е положение 2-е     »  Среднее . . .	1 м—0,99 мкм	1 м—0,90 мкм
	1 м—1,12 мкм	1 м—1,01 мкм
	1 м—1,06 мкм	1 м—0,96 мкм

где  $\delta$  — случайные погрешности измерения;  $n$  — число сличившихся интервалов, составило 0,04 мкм, что хорошо согласуется с расчетной величиной погрешности.

Для оценки погрешности измерения штриховых мер на компараторе было проведено круговое взаимное сличение сантиметровых подразделений трех штриховых мер: № 006, № 0028 и № 0022. При отсутствии погрешности измерения сумма измеренных разностей длин:  $\Delta l$  (№ 006—№ 0028),  $\Delta l_2$  (№ 0028—№ 0022) и  $\Delta l_3$  (№ 0022—№ 006) должна была бы быть равна нулю. В табл. 1 представлены результаты этого сличения.

Проведены сличения рабочих эталонов штриховых мер № 564, № 566, № 567, № 568, № 611 и № 006 со вторичным эталоном — платино-иридиевой мерой № 11 на 4-метровом компараторе и на ФЭК-1000. Сличения производились по принятой методике двумя сериями по шесть приемов измерений в каждой серии. Среднее квадратическое отклонение результатов измерений в отдельных сериях колеблется от 0,04 до 0,06 мкм, т. е. такого же порядка, что и при взаимном сличении трех штриховых мер. Это подтверждает правильность оценки погрешности измерения по внутренней сходимости. Как видно из табл. 2, расхождение результатов измерений, полученных на ФЭК-1000 в двух положениях сравниваемых мер, колеблется от 0,02 до 0,29 мкм. При сличении мер на оптико-механическом компараторе разность результатов в двух положениях колеблется в тех же пределах.

При сличении эталонов длины на ФЭК-1000 время поверки сокращается почти в шесть раз. По результатам исследований можно судить о пригодности компаратора ФЭК-1000 для поверки образцовых штриховых мер I-го разряда с необходимой для этого точностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каяк Л. К., Тришин Н. В., Ячменцев О. В. Автоматический фотоэлектрический продольный компаратор. — Труды метрологических институтов СССР, 1968, вып. 101(151), с. 63—68.
2. Алексеев П. П., Каяк Л. К., Тришин Н. В., Ячменцев О. В. Автоматическая поверка подразделений штриховых мер длиной до 1 м. — «Измерительная техника», 1970, № 11, с. 30—32.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.713.082.54

В. М. Хавинсон

вним

#### О ВЫБОРЕ СХЕМЫ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО КОМПАРАТОРА

Преимущества применения лазеров в качестве источника света в интерференционных компараторах для измерения штриховых мер длины в достаточной степени очевидны. Поэтому в метрологических центрах ряда стран (ГДР, ФРГ, США, Англия, Франция и др.) ведется разработка лазерных интерференционных компараторов.

Существует два основных типа схем, по которым могут строиться приборы для измерения длины штриховых мер методом счета интерференционных полос:

1) в схемах I типа на неподвижном основании расположены фотоэлектрический микроскоп для фиксации штрихов измеряемого интервала и неподвижная часть интерферометра с источником света. Поверяемая мера установлена на перемещающейся каретке, на которой закреплен отражатель интерферометра;

2) в схеме II типа на неподвижном основании расположены измеряемая мера и интерферометр с источником света, а микроскоп и подвижный отражатель интерферометра связаны с перемещающейся кареткой.

Подобные схемы могут применяться и для измерения длины концевых мер методом счета интерференционных полос. Их отличие заключается лишь в том, что фиксацию концов измеряемого интервала в этом случае производят не фотоэлектрическим микроскопом, а либо с помощью дополнительного интерферометра, работающего в белом свете [1], либо с помощью периферометра [2].

Рассмотрим основные источники погрешностей приборов, построенных по указанным схемам.

Непрямолнейность направляющих вызывает наклоны подвижной каретки при ее перемещении, которые приводят к погрешности (погрешность Аbbe)

$$\Delta = h\alpha + \frac{l\alpha^2}{2} \quad (1)$$

Здесь  $\alpha$  — наклон угла наклона каретки относительно неподвижного основания;  $h$  — расстояние между линией измерения и центром подвижного отражателя интерферометра;  $l$  — расстояние вдоль линии измерения между отражателем и фокусом микроскопа.

Наличие погрешности  $\Delta$  предъявляет определенные требования к точности изготовления направляющих, при этом доминирующую роль играет первый член в формуле (1), а второй член имеет заметную величину ( $\sim 0,01$  мкм) лишь при значительной непрямолинейности движения каретки ( $28''$  для  $l=1$  м). Очевидно, для исключения первого члена в формуле (1) необходимо поместить центр подвижного отражателя на линию измерения, что принципиально возможно в обеих схемах. Полностью же исключить погрешность  $\Delta$  можно лишь, совместив центр подвижного отражателя с фокусом микроскопа, это принципиально выполнимо только, если подвижный отражатель связан с микроскопом.

Погрешности, вызванные непрямолинейностью направляющих при произвольном расположении подвижного отражателя, могут быть снижены до допустимого предела коррекцией наклонов каретки при использовании интерферометра [3, 5] либо фотоэлектрического автоколлиматора [4] в качестве датчика наклонов. Однако следует отметить, что схемы коррекции в значительной степени усложняют конструкцию прибора и затрудняют работу с ним, поэтому представляется более целесообразным исключить погрешность выбором взаимного положения частей компаратора.

Кроме указанных «геометрических» погрешностей, существуют другие, вызываемые непараллельностью линии измерения и направления перемещения каретки, непараллельностью луча интерферометра и направления перемещения отражателя, неточностью автоколлимации в интерферометре и т. д. Эти погрешности здесь не рассматриваются, так как они определяются не конструктивной схемой, а лишь тщательностью юстировки прибора.

Рассмотрим наиболее распространенные оптические схемы интерферометров, применяемых в приборах для измерения перемещений, с точки зрения возможности сочетания их со схемами I и II типа.

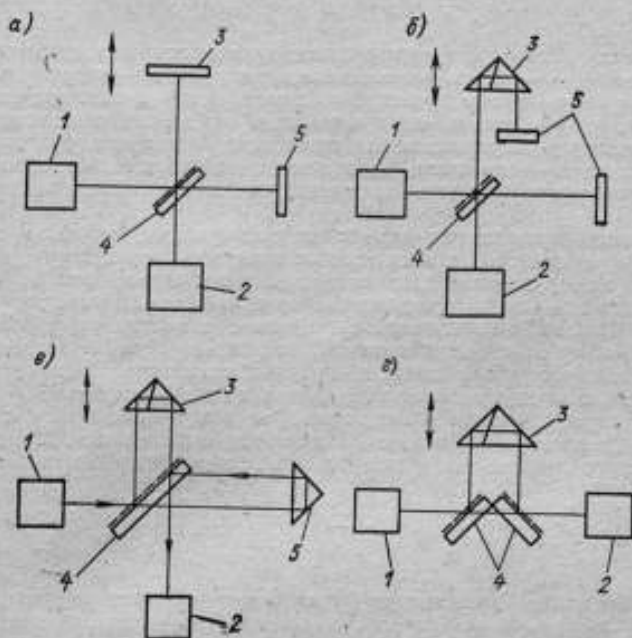
1. Схема интерферометра Майкельсона с перемещающимся отражателем в виде плоского зеркала (см. рис. а) нечувствительна к перемещениям зеркала в плоскости зеркала. Высокая чувствительность к наклонам зеркала накладывает очень жесткие ограничения на непрямолинейность направляющих, либо требует компенсации наклонов каретки. Требование снижения погрешности (1) вызывает необходимость производить отсчет в непосредственной близости от линии измерения. Без компенсации наклонов каретки схема может применяться лишь в сочетании со схемой I, так как совместить центр зеркала с фокусом микроскопа невозможно.

2. Схемы интерферометров с перемещающимся отражателем — триэдром (см. рис. в и г) нечувствительны к поворотам триэдра относительно



его вершины. Смещения вершины триэдра в плоскости, перпендикулярной лучу, вызывают смещение лучей на выходе интерферометра друг относительно друга и, как следствие, изменение сигнала на выходе интерферометра и появление погрешности из-за неидеальности волновых фронтов пучков. Начальная разность хода во второй из этих схем не может быть сделана равной нулю.

3. Схема интерферометра удвоенной чувствительности с перемещающимся отражателем в виде триэдра (см. рис. б) сочетает в себе достоинства схем в, г и а. Она нечувствительна как к трансляции триэдра в плоскости, перпендикулярной лучу, так и к поворотам вокруг вершины.



Оптические схемы интерферометров

1 — источник монохроматического излучения; 2 — приемник излучения; 3 — перемещающийся отражатель; 4 — светоделительный элемент; 5 — неподвижный отражатель.

Схемы с отражателем в виде триэдра (см. рис. б, в и г) могут применяться без компенсации наклонов каретки в сочетании с любой из схем I или II типа (вершину триэдра легко совместить с фокусом микроскопа).

Переходим к анализу погрешностей измерения длины методом счета интерференционных полос, вызванных влиянием внешних условий на результат измерения. К основным относятся погрешность, вызванная градиентом температуры меры, и погрешность показаний интерферометра.

Снижению градиента температуры меры могут способствовать:

- уменьшение габаритов прибора, что предполагает применение схемы с перемещающимся микроскопом;
- тщательная теплоизоляция прибора от влияния внешней среды;
- применение теплопроводного материала (например, меди) для выравнивания температуры внутри прибора;

г) вынесение всех локальных источников тепла за пределы теплоизолирующего кожуха. В случае невозможности выполнения этого требования источники тепла должны охлаждаться проточной жидкостью со стабильной температурой.

Влияние градиента температуры можно снизить, измеряя температуру меры в нескольких точках (не менее трех) и внося соответствующие поправки в результат измерений.

При измерении методом счета интерференционных полос величина перемещения

$$L = \frac{N}{k} \cdot \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n} - l_0 \frac{\Delta n}{n}, \quad (2)$$

где  $N$  — число интерференционных полос, подсчитанных счетчиком за время перемещения;  $\lambda_{\text{вак}}$  — длина волны света в вакууме;  $n$  — показатель преломления воздуха в момент времени, соответствующий окончанию счета;  $\Delta n = n - n_0$  — изменение показателя преломления за время измерения;  $l_0$  — начальное смещение отражателя из положения, соответствующего нулевой разности хода;  $n_0$  — показатель преломления воздуха в момент начала счета;  $k$  — постоянный коэффициент, зависящий от оптической схемы интерферометра.

Показатель преломления зависит от температуры, давления и состава воздуха. Расчет показателя  $n$  по данным измерений температуры, влажности и давления воздуха может дать относительную погрешность  $\delta n$  не менее, чем  $10^{-7}$ , так как полный учет состава воздуха в приборе практически невозможен [5]. Показатель преломления воздуха с помощью рефрактометра может быть измерен с более высокой (по крайней мере на порядок) точностью. Таким образом, при высоких требованиях к точности измерений применение рефрактометра не только оправдано, но и необходимо.

Температура, давление и состав воздуха могут изменяться в процессе измерений (счета полос). Тогда относительное изменение показателя преломления воздуха выражается через относительные изменения температуры и давления.

$$\frac{\Delta n}{n} \approx 3 \cdot 10^{-4} \left( \frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta T}{T} \right), \quad (3)$$

Скорость изменения давления воздуха может достигать в отдельные дни  $0,05 \text{ Н/м}^2 \text{ с}$ ; при такой скорости согласно (3) скорость изменения показателя преломления будет  $\frac{dn}{dt} \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ . Изменение температуры воздуха

на  $0,1^\circ \text{С}$  дает  $\frac{\Delta n}{n} = 10^{-7}$ .

Изменение внешних условий за время измерения влияет на величину второго члена в правой части формулы (2). Для учета этого влияния необходимо знать начальную разность хода в интерферометре (длину  $l_0$ ) и измерять или вычислять значение показателя преломления как в начале, так и в конце измерения перемещения. При нулевой начальной разности хода ( $l_0 \approx 0$ ) второй член в формуле (2) исчезает и отпадает необходимость в измерении показателя преломления в начальный момент. Тогда выражение примет вид

$$kL = N \frac{\lambda_{\text{вак}}}{n}, \quad (4)$$

Требуемая точность установки  $l_0 = 0$  определяется из условия

$$l_0 \frac{\Delta n_{\text{max}}}{n} < \delta,$$

где  $\delta$  — допустимая погрешность, из-за внешних условий;  $\Delta n_{\max}$  — максимальное изменение показателя преломления за время измерения.

Таким образом, для полного исключения влияния изменений внешних условий на результат измерения перемещения достаточно лишь соблюдать следующий порядок при измерении: вначале производится счет интерференционных полос, а затем в полученный результат вводится поправка на показатель преломления, соответствующий моменту окончания счета. Счет полос должен начинаться всегда от нулевой разности хода. Отметим также, что снижению всех погрешностей, связанных с изменением внешних условий, будет способствовать уменьшение продолжительности измерений.

На основании приведенного анализа кратко сформулируем общие требования к схеме и компоновке интерференционного лазерного компаратора:

1) оптимальной является схема компаратора с перемещающимся микроскопом, с фокусом которого совмещен центр подвижного отражателя интерферометра; в интерферометре наиболее рационально применение схемы рис. 6;

2) для введения поправки на показатель преломления прибор необходимо снабдить рефрактометром;

3) электронная аппаратура должна обеспечивать учет данных, полученных от рефрактометра в любой момент счета полос;

4) счет интерференционных полос следует начинать всегда от положения каретки с подвижным отражателем, при котором разность хода в интерферометре близка к нулю.

Выполнение этих требований позволит решить задачу сведения погрешности измерения длины к минимуму, который будет определяться точностью фиксации концов измеряемого интервала, точностью измерения температуры меры и воспроизводимостью длины волны лазерного источника излучения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дранкин М. Я., Свердличенко В. Д., Шестопадов Ю. Н. Интерференционный компаратор для измерения концевых мер длины. Пат. свид. СССР № 213358, «Бюлл. изобр.», 1968, № 10.
2. Богуславский М. Г., Каган А. М. Оптико-электронный щуп. — «Измерительная техника», 1970, № 10, с. 24—26.
3. Kawasaki Harumi Measuring method and apparatus which compensate for Abbe's error. Patent США, кл. 356—106, (G01d9/02) № 3820902 заявл. 11.04.72, опубл. 28.06.74.
4. Sakurai Yoshimasa Metrology. — "Bull. Jap. Soc. Precis. Eng.", 1974, 8, N 2, pp. 87—95.
5. Terrien J. An aire refractometer of high sensibility. — "Metrology", 1965, v. 3, pp. 8—12.

Поступила в редакцию 31/Х 1973 г.

УДК 620.181.428.4.05.082.54

В. Г. Цорин

ВНИИМ

#### ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ДИЛАТОМЕТРОВ

Оптические измерительные схемы интерференционных дилатометров требуют юстировки не только при изготовлении, но и непосредственно в процессе эксплуатации. От правильной эксплуатации оптической измерительной схемы интерференционного дилатометра во многом зависит точность изме-

рений на нем. С целью изучения некоторых особенностей этих схем был исследован интерференционный dilatометр ВНИИМ [1] (рис. 1). Исследуемый образец 1, помещенный в камеру 16, с заданной температурой устанавливается между двумя стеклянными пластинами — нижней 2 и верхней 3. Затем устанавливаются теплозащитные или вакуумно-плотные экраны 4, 5 и 6. Образец изготавливается таким образом, чтобы рабочие поверхности пластин находились под заданным углом относительно друг друга. При освещении системы, состоящей из образца 1 и пластин 2 и 3, параллельным пучком монохроматического света можно наблюдать интерференционные полосы равной толщины. Изображение источника света 15 проектируется конденсором 14 на плоскость входной щели 13 монохроматора 12. Выходная

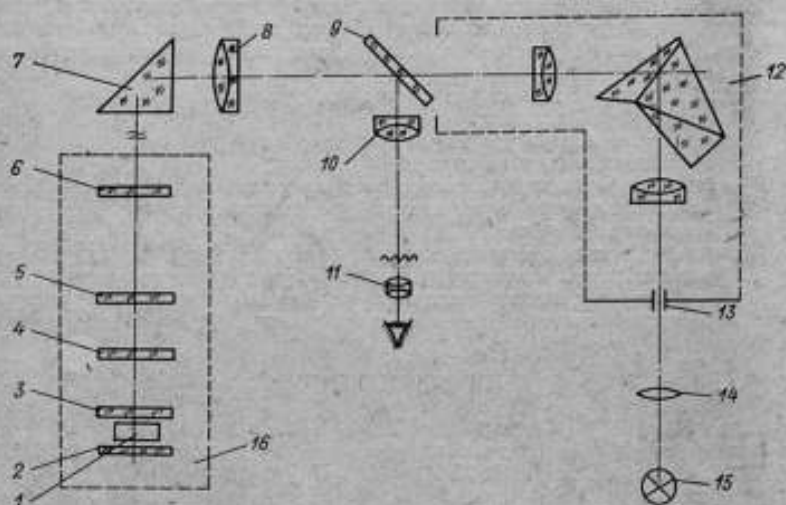


Рис. 1. Оптическая схема интерференционного dilatометра ВНИИМ

щель последнего совпадает со щелевой диафрагмой 9, выполненной в виде зеркала с прорезью, установленного в фокальной плоскости объектива 8, по выходе из которого параллельный пучок направляется на исследуемый образец с помощью призмы 7.

Наблюдательная система интерферометра состоит из объективов 8 и 10, поворотного зеркала 9 и окулярного микрометра 11. При измерении температуры в камере 16 длина образца 1 изменяется на некоторую величину  $\Delta L$ , в результате чего порядок интерференции в поле зрения интерферометра изменяется на величину  $\Delta N$ . Зная длину волны излучения  $\lambda$ , легко определить изменение длины образца по формуле [2]

$$\Delta L = \Delta N \frac{\lambda}{2 \cos \varphi}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угол падения светового пучка на основное зеркало интерферометра (на пластину 2).

Погрешность измерения зависит от погрешностей определения начальной длины образца  $L_0$  и  $\Delta L$ , причем погрешность измерения  $\Delta L$  значительно больше, чем погрешность определения  $L_0$  [1].

При оценке случайных погрешностей метода интерференционных измерений следует учитывать также качество изображения интерференционной

картины (ее контрастность). От контрастности изображения зависит точность отсчета дробной части полосы. Кроме того, недостаточная контрастность в сочетании со слабой освещенностью вызывает быстрое утомление оператора, в результате чего снижается как производительность, так и точность измерений. Поэтому при юстировке интерференционных dilatометров следует добиваться максимальной контрастности и освещенности изображения.

Контрастность интерференционной картины в двухлучевом интерферометре типа Майкельсона зависит от многих причин: разности хода, размеров входной диафрагмы интерферометра, от параллельности светового пучка (в случае наблюдения полос равной толщины), расстояния плоскости локализации интерференционной картины до плоскости наблюдения и т. д.

Рассмотрим некоторые из них.

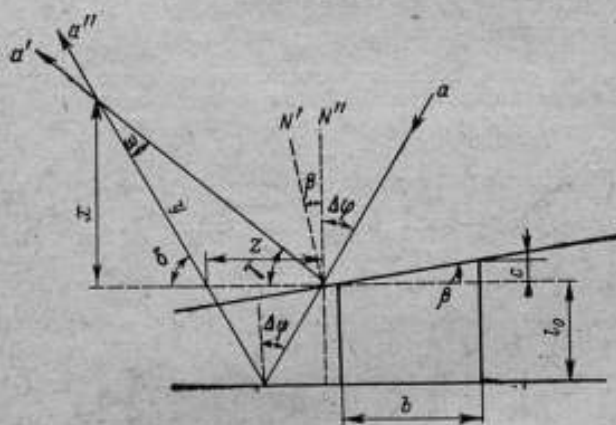


Рис. 2. Ход лучей при образовании интерференционной картины

Зависимость контрастности интерференционной картины от разности хода  $\Delta$  в интерферометре можно описать выражением

$$\bar{K}(\Delta) = 1 - \frac{N(\Delta)}{N_{\max}} = 1 - \frac{L_{\text{изм}}}{L_{\max}} \quad \text{при } \bar{K}(0) = 1, \quad (2)$$

где  $\bar{K}(\Delta)$  — контрастность, соответствующая разности хода  $\Delta$ ;  $N_{\max} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  — максимальная интерференция для данного источника света с длиной волны  $\lambda$  при полуширине спектральной линии  $\Delta\lambda$ ;  $N(\Delta) \frac{\Delta}{\lambda}$  — порядок интерференции;  $L_{\text{изм}}$  — измеряемая разность хода;  $L_{\max}$  — максимальная разность хода, при которой еще наблюдается интерференционная картина.

Контрастность интерференционной картины уменьшается также из-за смещения входной диафрагмы интерферометра с оптической оси прибора. Вследствие этого происходит наклон пучка света относительно основного зеркала интерферометра, вызывающий погрешность измерения длины, называемую косинусной ошибкой  $\Delta\varphi$ . Значение этой ошибки зависит от размера входной щели интерферометра фокусного расстояния объектива коллиматора, а также от качества юстировки прибора, производимой перед



началом измерений в процессе установки исследуемого образца. Из-за наклона пучка света плоскость локализации интерференционной картины [3] не совпадает с нижней поверхностью верхней пластины интерферометра (либо с верхней поверхностью нижней пластины) на величину  $x$ , зависящую от угла  $\Delta\varphi$ , а также от угла интерференционного клина  $\beta$  (рис. 2). Поскольку наблюдатель в процессе измерений должен видеть резкое изображение образца, которое, как указывалось выше, не совпадает с плоскостью локализации, то интерференционная картина будет иметь заведомо уменьшенную контрастность

$$K' = K(1 - \Delta K), \quad (3)$$

где  $K'$  и  $K$  — контрастность интерференционной картины в плоскости наблюдения и в плоскости локализации соответственно;  $\Delta K$  — уменьшение контрастности, вызываемой косинусной ошибкой  $\Delta\varphi$ .

Для определения величины  $\Delta K = \frac{x}{S}$  необходимо:

а) найти смещение плоскости локализации относительно поверхности образца из-за наличия косинусной ошибки  $\Delta\varphi$  при заданной величине угла интерференционного клина  $\beta$ . Для простоты будем рассматривать ход только одного луча  $a$ .

Из рис. 2 видно, что  $x = y \sin \delta$ ,  $y = \frac{z \sin \gamma}{\sin \omega}$ ,  $z = 2L_0 \sin \Delta\varphi$ , откуда, учитывая, что углы  $\Delta\varphi$  и  $\beta$  — малы, а  $\omega = 2\beta$ , получим

$$x = \frac{L_0 \Delta\varphi \sin \gamma \sin \delta}{\beta} \quad (4)$$

или

$$x = \frac{L_0' \Delta\varphi}{\beta} \quad (5)$$

В формуле (5)  $L_0 = \text{const}$ ,  $\beta = \text{const}$ , а  $\Delta\varphi \neq \text{const}$  и зависит только от юстировки прибора. При правильной юстировке

$$\Delta\varphi = \frac{\sigma_m}{2f'_{об}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_m$  — ширина входной щели интерферометра;  $f'_{об}$  — фокусное расстояние объектива коллиматора.

Угол клина  $\beta$  может быть различным для каждого образца и определяется как

$$\beta = \frac{c}{b}, \quad (7)$$

где  $c$  — разность высот ножек образца;  $b$  — высота равнобедренного треугольника, образованного тремя ножками образца. Подставив эти данные в (5), получим

$$x = \frac{\sigma_m b L_0}{2 c f'_{об}} \quad (8)$$

Для dilatометра ВНИИМ [1]  $x \approx 150$  мкм.

б) рассчитать глубину области локализации [3] интерференционной картины  $S$

$$S = \frac{\lambda}{\omega}, \quad (9)$$

где  $\omega$  — угол сложения интерферирующих лучей,  $\epsilon$  — угловой размер источника света.

В нашем случае  $\omega = 2\beta$  и  $\epsilon = \frac{d_{\text{ш}}}{f'_{\text{об}}}$  ( $d_{\text{ш}}$  — диагональ входной щели интерферометра), откуда

$$S = \frac{\lambda f'_{\text{об}} b}{2\epsilon} \quad (10)$$

С другой стороны, при рассмотрении формулы (9) легко видеть, что  $\frac{\lambda}{\omega} = \epsilon$  ( $\epsilon$  — ширина интерференционных полос), тогда

$$S = \frac{\epsilon f'_{\text{об}}}{d_{\text{ш}}} \quad (11)$$

Теперь величина  $\Delta K$  определится как

$$\Delta K = \frac{a_{\text{ш}} d_{\text{ш}} L_0}{\lambda (f'_{\text{об}})^2} \quad (12)$$

или

$$\Delta K = \frac{d_{\text{ш}} a_{\text{ш}} L_0 b}{2 (f'_{\text{об}})^2 \epsilon} \quad (13)$$

Для дилатометра [1]  $\Delta K \approx 0,45$ .

При неправильной юстировке прибора величина  $\Delta K$  может возрасти до единицы, что, согласно формуле (3), приведет к полному падению контрастности изображения интерференционной картины.

Для уменьшения влияния косинусной ошибки  $\Delta\varphi$  на контрастность изображения следует фокусировать наблюдательную систему на ту из пластин интерферометра, которая находится ближе к плоскости локализации. Кроме того, на контрастность интерференционной картины влияют блики от нерабочих поверхностей, так называемые паразитные блики. Поскольку верхняя и нижняя пластины интерферометра используются без покрытий, интенсивность основных интерферирующих пучков и интенсивность бликов от нерабочих поверхностей пластин, экранов и поворотной призмы примерно одинаковы.

Пусть  $K$  — контрастность интерференционных полос при отсутствии бликов. Известно [4], что

$$K = \frac{E_0 - E_T}{E_0 + E_T} \quad (14)$$

где  $E_0$  и  $E_T$  — освещенность светлых и темных полос соответственно,  $E_0 + E_T$  — суммарная (интегральная) освещенность поля. Легко видеть, что при наличии  $n$  паразитных бликов, накладывающихся на основное изображение и равных по освещенности величине  $E_0 + E_T$ , результирующая контрастность будет

$$K(n) = \frac{K}{n+1} \quad (15)$$

В зависимости от качества юстировки интерферометра и конструкции дилатометрической камеры количество паразитных бликов может меняться от нуля до девяти.

На рис. 3 показан вид поля зрения прибора при снятом окулярном микрометре.

При юстировке интерферометра в процессе установки образца следует добиваться, чтобы  $n=0$ .

Контрастность интерференционной картины зависит от размера входной щели интерферометра  $d_{\text{ш}}$ , который может быть рассчитан [5] по формуле

$$d_{\text{ш}} \leq 2 \dot{f}_{\text{об}} \sqrt{\frac{\lambda}{2\Delta}} \quad (16)$$

В dilatометре ВНИИМ за  $d_{\text{ш}}$  принимают длину диагонали прямоугольной щели.

$$d_{\text{ш}} \leq 5 \dot{f}_{\text{об}} \cdot 10^{-3} \text{ (мм)}. \quad (17)$$

Ответственной операцией при юстировке интерференционного dilatометра является установка исследуемого образца, так как он входит в си-

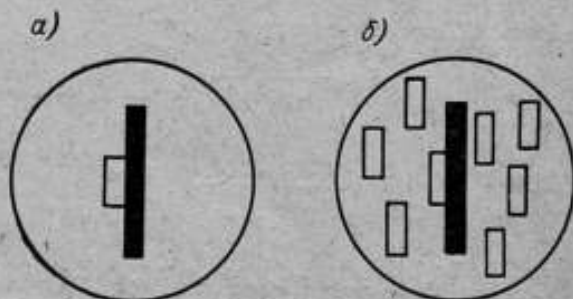


Рис. 3. Вид поля зрения прибора при снятом окулярном микрометре: а) при  $n=0$ ; б) при  $n=7$ .

стему прибора. Образец изготавливается в виде полого цилиндра или призмы и имеет по три опорные ножки с каждой торцевой стороны, расположенные под углом  $120^\circ$  относительно друг друга [6].

Как показано в работе [3], в интерферометрах типа Майкельсона ребро интерференционного клина должно быть ориентировано таким образом, чтобы интерференционные полосы равного наклона были параллельны входной щели интерферометра. В dilatометре такое положение соответствует вертикальному расположению полосы равной толщины в поле зрения интерферометра. В этом случае при прочих равных условиях будет наблюдаться максимально возможная контрастность интерференционной картины. При установке образца в интерферометр возможны следующие четыре случая (рис. 4).

Если ребро интерференционного клина ориентировать таким образом, чтобы его двугранный угол был направлен на наблюдателя, стоящего лицом к окуляру прибора, то в зависимости от взаимного расположения угла клина и угла параллельного пучка света на нижнюю пластину интерферометра, эти углы могут быть либо одного знака (рис. 4, а), либо противоположных (рис. 4, б). В первом случае автоколлимационное изображение входной щели прибора (основной блик) при снятом окулярном микрометре будет наблюдаться слева от щели (рис. 3, а), а плоскость локализации интерференционной картины, проходящая через точку пересечения лучей  $a'$  и  $a''$  [3], будет находиться выше образца. Следовательно, наблюдательную систему надо фокусировать на верхнюю пластинку интерферометра.

Во втором случае (рис. 4, б) основной блик при снятом окуляре будет наблюдаться справа от щели, а плоскость локализации окажется ниже об-

разца. Теперь наблюдательную систему следует сфокусировать на нижнюю пластину интерферометра. При ориентации ребра клина в противоположную сторону возможны опять два случая расположения угла клина и угла падения пучка (рис. 4, в и 4, г), при которых систему необходимо сфокусировать на нижнюю или верхнюю пластины интерферометра соответственно.

Рассмотрим в качестве примера последовательность юстировки, соответствующую случаю (рис. 4, а). При установке образца необходимо произвести следующие операции:

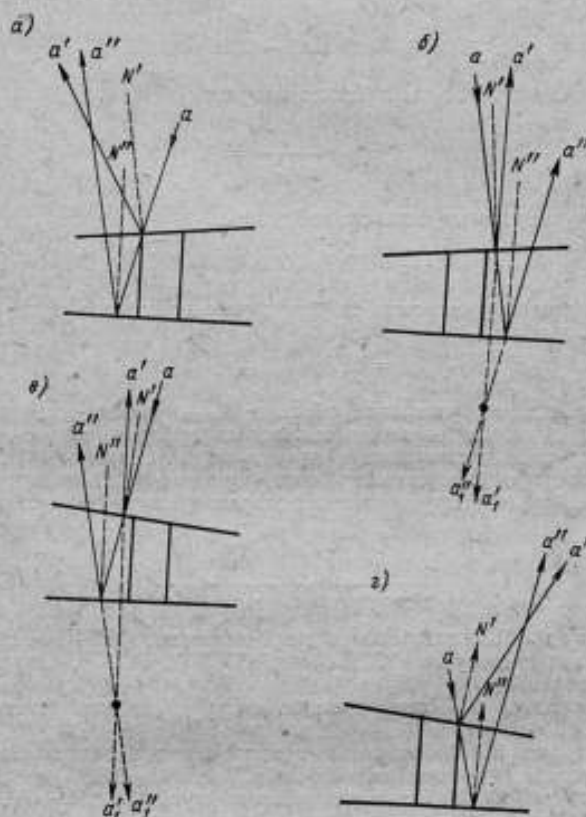


Рис. 4. Возможные положения образца при его установке в dilatометре

1) ориентировать образец вместе с верхней пластиной таким образом, чтобы ребро интерференционного клина было направлено на наблюдателя, стоящего лицом к окуляру прибора (проверяется по смещению интерференционных полос при легком нажатии на верхнюю пластину);

2) путем перемещений установить оптическую часть dilatометра под таким углом к образцу, чтобы изображение светящейся щели прибора находилось слева от самой щели и вплотную к ней (выполняется при снятии окулярного микрометра);

3) сфокусировать наблюдательную систему на верхнюю пластину интерферометра,

Максимальную контрастность  $K_{\max}$  при правильной юстировке интерференционного дилатометра типа ВНИИМ можно вычислить по формуле. Контрастность при данной разности хода  $\Delta$  будет

$$K(\Delta) = 1 - \frac{L_{\text{изм}}}{L_{\text{max}}} = 1 - \frac{20}{200} = 0,9.$$

Контрастность, обусловленную наличием косинусной ошибки  $\Delta\varphi$ , найдем по формуле (3)

$$K' = 1 - \Delta K = 1 - 0,45 = 0,55.$$

При устранении паразитных бликов получим

$$K(n) = \frac{1}{n+1} = 1.$$

Резльтирующую контрастность найдем как

$$K_{\max} = K(\Delta) K' K(n) = 0,5.$$

Если в процессе юстировки не будут устранены паразитные блики, получим

$$K(n) = 0,1 \text{ и } K_{\max} = 0,05.$$

При неправильной установке образца  $K_{\max}$  может еще уменьшиться. Таким образом, на одном и том же интерференционном дилатометре в зависимости от его юстировки и правильности установки образца можно получать различную контрастность интерференционной картины, что существенно скажется на метрологических характеристиках результатов измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амагуни А. Н. Интерференционный дилатометр ВНИИМ ДИ-2. «Труды метрологических институтов СССР», вып. 87(147), М.—Л., Изд-во стандартов, 1966, с. 20—28.
2. Романова М. Ф. Интерференция света и ее применение. М.—Л., ОНТИ, 1937, 123 с.
3. Коломойцев Ю. В. Волновые представления в теории интерферометров. — «Оптика и спектроскопия», 1956, вып. 7, с. 142—149.
4. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов, М.—Л., «Машинно-строение», 1966, 462 с.
5. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.—Л., Оборонгиз, 1953, 314 с.
6. Королева А. Н., Шевченко Е. Б. Дилатометрические измерения. М., Изд. НПОприборпром, 1965, 32 с.

Получила в редакцию 21/Х 1975 г.



## ВЫСОКОТОЧНЫЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ ЗЕРКАЛЬНО-ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

При измерении геометрических размеров объектов в большинстве случаев приходится решать две задачи: определять положение границы поверхности объекта и измерять перемещения. Применение лазеров в интерферометрах со счетчиками интерференционных полос сделало возможным высокоточные измерения линейных и угловых перемещений, поэтому большое значение приобретают методы и средства регистрации положения границы поверхности объектов с высокой точностью.

В настоящее время для этого используют контактные методы с «нулевым» измерительным усилием [1, 2] и бесконтактные методы с использованием явления интерференции света [3] и оптического щупа (перфлектметра) [4]. Метод оптического щупа применяется в компараторе с перфлектметром фирмы «Лейтц», универсальном измерительном микроскопе ИММ фирмы «Оптон» (ФРГ), универсальных измерительных микроскопах УИМ-21 и УИМ-23 [5], установке с перфлектметром ВНИИГК [6] и др.

Во ВНИИМ разработан оптико-электронный щуп (фотоэлектрический перфлектметр) [7, 8], который используется в качестве регистрирующей системы в установке для измерения диаметров образцовых колец.

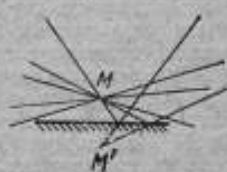


Рис. 1. Схема, поясняющая работу перфлектметра

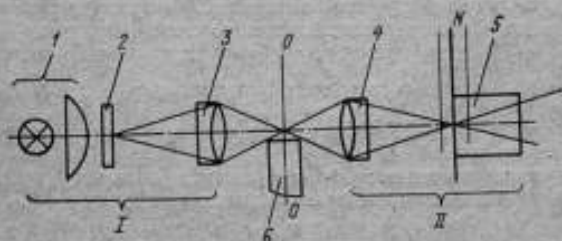


Рис. 2. Принципиальная схема перфлектметра:

1 — осветитель; 2 — марка; 3 — проекционный объектив; 4 — визирный объектив; 5 — регистрирующее устройство; 6 — объект измерения

Метод оптического щупа позволяет регистрировать на визирной оси перфлектметра противоположные поверхности измеряемого объекта с высокой чувствительностью (0,1—0,2 мкм) за счет эффекта оптического умножения, происходящего при зеркальном отражении от поверхности объекта (рис. 1). Как известно, при нарушении взаимного расположения относительно друг друга вдоль оптической оси (рис. 2) марки проекционного и визирного объективов и регистрирующего устройства происходит расфокусировка системы и появляется систематическая погрешность регистрации.

Возникновение систематической погрешности в результате расфокусировки можно объяснить тем, что перффлектометр является системой с двумя входными зрачками, а следовательно, и с двумя визирными осями, поэтому только в случае точного совмещения плоскости изображений проекционной системы с плоскостью предметов визирной системы визирные оси пересекаются на оптической оси. При расфокусировке визирные оси смещаются с оптической оси в разные стороны, что и приводит к погрешности регистрации границы поверхности относительно оптической оси системы.

Авторы, описывающие перффлектометры, обычно рассматривали систему оптического шупа без связи его с регистрирующей системой, работающей вместе с глазом оператора, и нестабильность перффлектометров от расфокусировки относили в основном за счет температурных изменений, сотрясений и других нарушений юстировки [6, 9], а различным системам приписывалась одинаковая чувствительность и точность [5].

Рассмотрим кратко типы регистрирующих устройств, применяющихся в перффлектометрах, и определим, какую погрешность можно ожидать при использовании их с оптическим шупом [14].

В настоящее время в перффлектометрах используют следующие устройства регистрации: окуляр с сеткой, окуляр с призмой двойного изображения, призму двойного изображения с экраном или бинокулярной насадкой [5, 6]. По условиям работы глаза оператора эти устройства можно разделить на три группы: 1) окуляр с призмой двойного изображения; 2) окуляр с сеткой; 3) призма двойного изображения с экраном.

Величину расфокусировки, зависящую от свойств глаза оператора, в плоскости изображений проекционной системы можно определить по формуле

$$B = \frac{f_{ок} A}{1000 V_2^2},$$

где  $f_{ок}$  — фокусное расстояние окуляра;  $A$  — глубина резкого видения глаза, зависящая от объема аккомодации и глубины резкости, выраженная в диоптрийной мере;  $V_2$  — линейное увеличение визирного объектива перффлектометра.

Для приборов первой группы величина  $A$  может достигать значения 4 дптр, т. е. полного объема аккомодации нормального глаза. Для приборов второй группы — 0,2 дптр при условии, что действующий выходной зрачок прибора  $d=2$  мм. При малых выходных зрачках (меньше 2 мм)  $A = \frac{0,8}{d^2}$  дптр и всегда больше 0,2 дптр [10]. Только для приборов третьей группы (с экраном) можно считать, что  $A=0$ .

Систематическая погрешность регистрации в результате расфокусировки компонентов перффлектометра можно определить по формуле

$$\delta = \pm \frac{b \lg ku'}{2},$$

где  $k$  — коэффициент, зависящий от геометрических параметров действующего зрачка визирной системы перффлектометра и распределения освещенности в нем;  $b$  — величина расфокусировки, приведенная к плоскости изображения проекционного объектива;  $u'$  — апертурный угол объективов перффлектометра.

В качестве примера определим величину погрешности от расфокусировки для перффлектометра из второй группы при следующих параметрах системы  $f_{ок}=25$  мм,  $d=2$  мм,  $V_2=5^*$ ,  $\sin u=0,12$  ( $u=7^\circ$ ). Так как перффлектометр работает половиной входного зрачка, то  $A$  в нашем случае будет равна 0,8 дптр. Расфокусировка в плоскости изображений проекционной системы составит 0,020 мм, что приведет к погрешности регистрации поверхности концевой меры длины  $\delta=0,5$  мкм ( $\pm 0,25$  мкм). Полученное значение соответствует результатам исследования установки с перффлектометром [6].

у которой при подобных конструктивных параметрах нестабильность показаний при многократной регистрации одного и того же участка концевой меры длины находилась в пределах  $\pm 0,2$  мкм.

Следует отметить, что характер проявления погрешности за счет аккомодации и глубины резкости глаза оператора зависят от состояния глаза. Экспериментальная проверка влияния свойств глаза оператора на точность измерений с помощью перффлектометров была проведена на универсальном микроскопе УИМ-23. Объектом регистрации служила измерительная поверхность концевой меры длины.

Результаты исследования и расчетные данные приведены в табл. 1. Как видно, погрешность регистрации будет наименьшей при работе глаза с экраном и очень большой при работе с окуляром без сетки в поле зрения. Преимущество экранных систем состоит в том, что у них для различных операторов нет необходимости перефокусировывать систему. В регистрирующих устройствах с окулярами при настройке их по глазу может возникнуть систематическая погрешность от расфокусировки перффлектометра.

Таблица 1

Средние квадратические отклонения регистрации границы поверхности концевой меры длины с помощью перффлектометра (мкм)

Тип регистрирующего устройства	Расчетные значения	Оператор		
		1	2	3
Призма двойного изображения с окуляром	1,2	0,98	0,92	0,92
Призма двойного изображения с окуляром и с сеткой в поле зрения	0,45	0,49	0,73	0,43
Призма двойного изображения с экраном	0,00	0,21	0,43	0,39
Сетка с экраном (биссектор)	0,00	0,16	0,29	0,14

Проведено сравнение чувствительности поперечных наводок регистрирующих устройств для двух типов перффлектометров: 1) с призмой двойного изображения и экраном и 2) с сеткой и экраном. Визирование в биссектор осуществляется операторами точнее, чем с помощью призмы двойного изображения. Это объясняется тем, что соотношение совмещаемых объектов в системе штрих—биссектор предпочтительнее для глаза, чем совмещение двух разноцветных штрихов.

Чтобы исключить систематическую погрешность регистрации от расфокусировки при юстировке перффлектометров применяют следующие способы:

1) измеряют с помощью перффлектометра аттестованную концевую меру длины и по результатам и свидетельству судят о правильности фокусировки системы;

2) измеряют с помощью перффлектометра внутренний и наружный размер блока скобы, составленного из трех концевых мер длины, и по результатам измерения наружного и внутреннего размеров судят о правильности юстировки.

Недостаток этих приемов — зависимость правильности фокусировки от точности измерительных средств приборов, от правильности установки на линию измерений аттестованных мер, точности их аттестации, а также от их длительности и трудоемкости. Во ВНИИМ разработана перффлектометр\*, правильность юстировки которого проверяется с помощью специальной заслонки, позволяющей последовательно экранировать противоположные арочки перффлектометра.

\* Каган А. М., Богуславский М. Г. Перффлектометр. Авт. свид. № 413371. «Бюлл. изобретений», 1974, № 4.

При наличии расфокусировки регистрирующее устройство фиксирует взаимное смещение прямых изображений марки и только при отсутствии расфокусировки этот эффект исчезает. Сравнение этого метода с предыдущими не выявило систематических погрешностей, превышающих 0,05 мкм, что дает уверенность в правильности фокусировки системы этим методом.

Для дальнейшего повышения точности регистрации границы отражающей поверхности объекта измерения, устранения субъективных ошибок оператора и автоматизации процесса регистрации был разработан оптико-электронный щуп\* (фотоэлектрический перфлектومتر). Он отличается от визуальных систем тем, что на место визуального регистрирующего устройства установлено фотоэлектрическое регистрирующее устройство [11]. Такие устройства нашли широкое применение в различных типах фотоэлектрических микроскопов и автоколлиматорах.

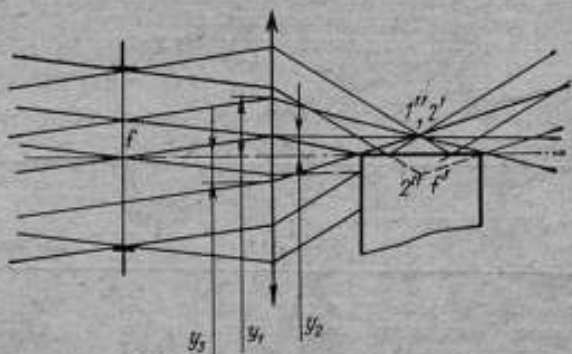


Рис. 3. Ход лучей в перфлектометре при регистрации ограниченной плоской поверхности

Фотоэлектрические регистрирующие устройства разделяются на два больших класса: без модуляции светового потока (системы интенсивности) и с модуляцией светового потока. У регистрирующих устройств второго класса по сравнению с первым значительно выше помехоустойчивость, стабильность. Регистрирующее фотоэлектрическое устройство перфлектметра состоит из модулятора, фотоэлектрического приемника и электронного блока регистрации. Этот блок может быть выполнен по принципу фотометрических, фазо-импульсных или модуляционных систем регистрации положения штрихов в фотоэлектрических устройствах.

Особенность работы этих устройств в системе оптического щупа заключается в том, что производится регистрация не изображения штриха, а искаженного поверхности объекта изображения марка. Это может привести к систематической погрешности регистрации, поэтому необходимо учитывать, в какой мере конструктивные элементы оптического щупа и характер отражающей поверхности (ее размеры и форма) сказываются на энергетическом и пространственном формировании зеркально-отраженного изображения марки.

Рассмотрим два случая регистрации с помощью оптического щупа границы поверхностей.

1. На рис. 3 изображен ход лучей при регистрации ограниченной плоской поверхности. Рассмотрим случай, когда проекционная система оптического

\* Алексеева Е. П., Богуславский М. Г., Каган А. М. Перфлектметр. Авт. свид. № 370456, «Бюлл. изобретений», 1973, № 11.

щупа выполнена с телецентрическим ходом лучей и проектирует изображение марки из бесконечности. По схеме определим

$$y_1 = \frac{h(2f+l)}{2l}; \quad y_2 = \frac{h(2f-l)}{2l}; \quad y_3 = -\frac{h(2f-l)}{2l},$$

где  $y_1$  — ордината луча в точке  $2''$ , который еще отражается от поверхности объекта и образует изображение точки  $2''$ ;  $y_2$  — ордината луча в точке  $2'$ , который проходит без отражения от поверхности объекта;  $y_3$  — ордината луча в точке  $1'$ , который еще отражается от поверхности объекта и образует изображение точки  $1''$ ;  $l$  — длина отражающей поверхности вдоль оптической оси;  $h$  — ширина изображения марки;  $f$  — фокусное расстояние проекционного объектива.

На изображениях выходного зрачка (рис. 4) проекционного объектива отложены ординаты крайних лучей, образующих изображение равноотстоящих от оптической оси точек марки 1 и 2. Как видно, изображение точек марки, лежащих в теле объекта  $2''$ , образуется меньшей площадью выходного зрачка, чем изображение точек

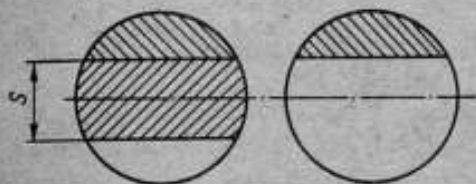


Рис. 4. Изображение выходного зрачка проекционного объектива перфлектметра

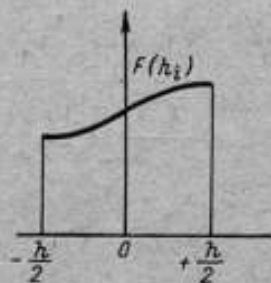


Рис. 5. График функции распределения светового потока в изображении зеркально-отраженной марки от плоской ограниченной поверхности

марки, лежащих вне тела объекта  $2'+1''$ . Функция распределения светового потока (рис. 5) в изображении зеркально-отраженной марки от плоской ограниченной поверхности в момент совмещения с оптической осью системы описывается следующим уравнением

$$F(h_i) = \frac{\pi R^2}{2} + \frac{2f}{l} h_i \sqrt{R^2 - \left(\frac{2f}{l}\right)^2 h_i^2} + R^2 \arcsin \frac{2f}{lR} h_i.$$

Здесь  $h_i \in \left[-\frac{h}{2}; \frac{h}{2}\right]$ ;  $R$  — радиус выходного зрачка проекционного объектива.

При таком распределении светового потока в изображении зеркально-отраженной марки фотоэлектрическая регистрация будет осуществляться с некоторым отступлением от геометрического центра марки и приведет к систематической погрешности регистрации поверхности.

Если экранировать по центру выходной зрачок проекционного объектива с помощью прямоугольного экрана, то можно уравнивать площади действующих зрачков, формирующих изображения противоположных точек изображения марки (рис. 4). Ширину экрана  $S$  можно определить из соотношения  $S = \frac{2f}{l} h$ .

Применить экран в оптическом щупе с целью уменьшения пятна контакта впервые предложил Р. Шульц (патент ФРГ № 926092). Экран, выбранный



соответствующим образом, позволяет уменьшить площадь пятна контакта и уравнивать освещенность различных точек изображения отраженной марки. Во ВНИИМ разработан оптико-электронный щуп [7], в котором с помощью поляриоида устраняется прямое изображение марки. Проекционный и визирный объективы снабжены специальными поляризатором и анализатором (рис. 6). Поляризатор и анализатор, выполненные одинаково, представляют собой два полукруга из поливиниловых поляриоидов 1, 2, ориентация плоскостей поляризации которых взаимно перпендикулярна; по отношению к линии раздела плоскость повернута на  $45^\circ$ . Поляризатор и анализатор ориентированы одинаково, что позволяет устранить прямое изображение марки в поле зрения регистрирующего устройства.

При регистрации границы поверхности объекта на оптической оси изображение марки строится только лучами, отраженными от поверхности объекта, поэтому автоматически устраняется неравномерность освещенности изображения марки.

В случае регистрации цилиндрической поверхности, ось которой

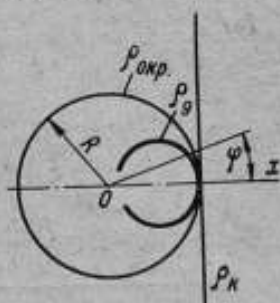


Рис. 6. Схема анализатора (поляризатора)

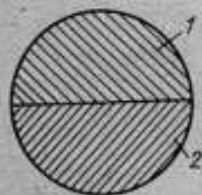


Рис. 7. Схема, поясняющая искажение марки перфлектومتра при ее отражении от образующей отверстия

расположена в направлении, перпендикулярном оптической оси перфлектومتра (случай измерения гладких калибров — колец в непрозрачном материале), зеркально отраженное образующей кольца изображение марки принимает форму дуги (рис. 7), уравнение которой имеет вид

$$R_d = 2r - \frac{r}{\cos \varphi},$$

где  $r$  — радиус цилиндрической поверхности.

Для того чтобы погрешность визирования из-за кривизны дуги была меньше наперед заданной допустимой величины, необходимо ограничивать шель модулятора по длине. Допустимую длину щели модулятора можно рассчитать по формуле

$$\alpha = 2.83 V_{\lambda} \sqrt{\Delta D},$$

где  $\Delta$  — допустимая погрешность регистрации;  $D$  — диаметр цилиндрической поверхности.

Так, для  $D=1$  мм;  $V_{\lambda}=30^\circ$ ;  $\Delta=0,02$  мкм, длина щели модулятора равна примерно 0,4 мм.

Экспериментальная проверка влияния кривизны образующей поверхности на точность регистрации была произведена при измерении диаметра кольца номинальным диаметром 3 мм. Результаты исследований, представленные в табл. 2, показали хорошее соответствие расчетным данным.

Допустимая высота цилиндрической поверхности кольца

$$\frac{2f}{S} h \leq H \leq r \frac{\sqrt{S^2 + 16f^2 \operatorname{tg}^2 u} - S}{2f \operatorname{tg}^2 u} < 2f.$$

Фотоэлектрические перфлектотометры во ВНИИМ созданы на базе универсального измерительного микроскопа УИМ-23 в двух вариантах — неавтоматическом и автоматическом. В первом варианте использовано фотоэлектрическое регистрирующее устройство фотометрического фотоэлектрического микроскопа [12]; во втором — фотоэлектрическое регистрирующее устройство, подобное устройству фотоэлектрического автоколлиматора [13], с той разницей, что управляющий сигнал после усиления поступал на пьезокерамическую подвижку предметного стола, а не в цепь вибратора.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что чувствительность фотоэлектрического перфлектотометра составляет величину порядка 0,005 мкм. С помощью фотоэлектрического перфлектотометра проведено сличение прецизионной установки для высокоточной аттестации образцовых колец ВНИИМ с установкой НФЛ Англии. Сличение производилось по кольцу номинальным диаметром 2,78 мм. Расхождение результатов измерений среднего сечения не превысило 0,1 мкм.

Исследования показали, что высшей точностью регистрации границы зеркально-отражающей поверхности объектов с помощью визуальных перфлектотометров обладают перфлектотометры с экранами для наблюдения изображений марок.

Разработанные фотоэлектрические перфлектотометры, отъюстированные предлагаемым методом, позволяют регистрировать границы зеркально-отражающей поверхности объектов с погрешностью порядка 0,01 мкм. Объектами измерения могут быть образцовые и установочные кольца, скобы, гладкие и резьбовые калибры-пробки, зубчатые колеса и другие детали, имеющие зеркально-отражающие поверхности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Н. Н. и др. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. Машгиз, 1967, 391 с. с ил.
2. Шляхтер Л. М., Шин В. Новый прецизионный метод измерения размеров и микропеременений. — «Измерительная техника», 1968, № 2, с. 25—27.
3. Erben A. Optisches Antasten von Prüflingen mit Hilfe von Interferenzlinien bei Längen- und Winkelmessungen mit Meßmikroskopen. — "Feingerätetechnik", 1973, N 3, s. 127—134.
4. Schulze R. Vergleich von Strichmaßen und Körpermaßen mit dem Perfektometer. Archiv für technisches Messen und industrielle Meßtechnik, 1956, N 243, s. 89—92.
5. Данилевич Ф. М., Соколов И. А. Методы контроля диаметров отверстий оптическим способом. — «Измерительная техника», 1972, № 10, с. 15—17.
6. Логачева Л. Н. Установка для внутренних измерений сквозных цилиндрических отверстий диаметром от 0,5 до 50 мм. — «Измерительная техника», 1965, № 2, с. 18—21.

Таблица 2

Экспериментальные данные проверки влияния длины щели модулятора на точность регистрации цилиндрической поверхности  
( $V_n = 30^\circ$ ;  $r = 1,5$  мм)

Длина щели модулятора, мм	Погрешность регистрации, мкм	
	расчетные данные	экспериментальные данные
0,36	0,005	0
1,08	0,05	0,06
3,24	0,5	0,46

7. Богуславский М. Г., Каган А. М. Оптико-электронный шуп.— «Измерительная техника», 1971, № 10, с. 24—26.

8. Алексеева Е. П. и др. Прецизионная установка для измерения диаметров отверстий в длинах световых волн.— «Измерительная техника», 1972, № 11, с. 14—15.

9. Веснина В. А., Коломийцев Ю. В. Метод «двойного перффлектометра» для измерения диаметров малых отверстий.— «Оптико-механическая промышленность», 1971, № 12, с. 34—37.

10. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. «Машиностроение», 1968, 292 с. ил.

11. Корндорф С. Ф. Фотоэлектрические измерительные устройства в машиностроении. «Машиностроение», 1965, 193 с.

12. Бржезинский М. Л. и др. Фотометрический фотоэлектрический микроскоп.— Труды институтов Комитета стандартов, 1965, вып. 78(138), с. 43—48.

13. Богуславский М. Г. и др. Государственный первичный эталон единицы плоского угла радиана.— «Измерительная техника», 1973, № 6, с. 9—11.

14. Каган А. М., Богуславский М. Г. Влияние свойств глаза наблюдателя на точность измерения при помощи перффлектометра.— «Измерительная техника», 1974, № 3, с. 25—27.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 681.777.5-52:535.315.089.6

М. Г. Богуславский, В. Ц. Вольперт

вним

### АВТОКОЛЛИМАЦИОННАЯ УСТАНОВКА С АВТОМАТИЧЕСКИМ НАВЕДЕНИЕМ ДЛЯ СЛИЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВЫХ МНОГОГРАННЫХ ПРИЗМ

В настоящее время основным средством передачи размера единицы плоского угла являются образцовые многогранные призмы, а основным методом — автоколлимационный.

Все методы измерения углов многогранных призм основаны на сравнении углов этих призм с одним или несколькими известными углами или углами, определяемыми в процессе измерений. При измерении посредством двух автоколлиматоров все углы многогранной призмы сравниваются с углом, образованным между осями автоколлиматоров. На гониметре углы призмы измеряются путем сравнения их с углами лимба прибора. При этом точность измерений в значительной мере определяется погрешностями лимба, которые могут достигать нескольких секунд. К недостаткам этого метода относятся большая трудоемкость юстировки автоколлиматоров, наличие погрешности, связанной с различием их оптических характеристик, нестабильность задаваемого угла, невозможность поверки призм с малыми рабочими углами, относительно большие габариты прибора.

Поэтому для измерения углов образцовых призм 1 и 2-го разряда был выбран метод сравнения углов поверяемой призмы с углами образцовой посредством одного автоколлиматора, обеспечивающий высокую точность.

Методом сравнения можно осуществлять как сличение, так и калибровку многогранных призм. При сличении призмы устанавливаются одна над другой одноименными гранями и измеряют соответствующие малые двухгранные углы. Метод удобен и обладает высокой производительностью.

При калибровке двух призм с помощью одного автоколлиматора производится относительные перестановки граней у обеих или у одной призмы, и все

углы одной призмы сравнивают со всеми углами другой. Преимуществом метода является возможность проверки двух неаттестованных призм, все углы которых определяются в процессе измерений. К недостаткам следует отнести неодновременность отсчетов при измерении краев нижней и верхней призм. Однако указанные недостатки и связанные с ними погрешности могут быть устранены при автоматизации метода. В связи с этим была разработана фотоэлектрическая автоколлимационная установка повышенной точности с автоматическим наведением и цифровым отсчетом показаний [1, 2]. Установка состоит из фотоэлектрического автоколлиматора с автоматическим наведением, поворотного столика, автоматической шторки с приводом, блока автоматике и цифрового отсчетного прибора. Основной частью ее является фотоэлектрический автоколлиматор с системой автоматического наведения [3], схема которого показана на рис. 1. Автоколлиматор состоит из собственно автоколли-

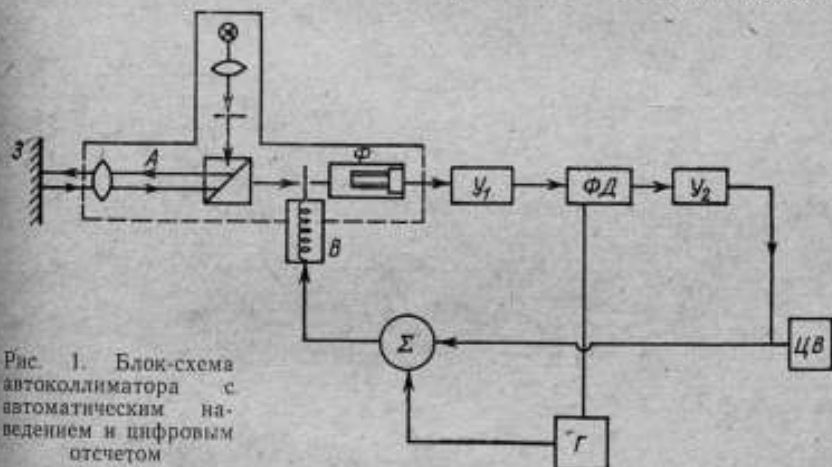


Рис. 1. Блок-схема автоколлиматора с автоматическим наведением и цифровым отсчетом

матора А, вибратора В и фотоприемника Ф. Система автоматического наведения включает следующие блоки: усилитель переменного тока  $У_1$ , фазочувствительный детектор ФД, усилитель постоянного тока с интегрирующей цепью  $У_2$  и генератор опорного напряжения Г. Марка, выполненная в виде щели шириной 20 мкм и длиной 4 мм и освещаемая с помощью системы лампа-конденсор, позволяет получить в плоскости изображения край тонкий штрих. В этой же плоскости относительно марки колеблется щель вибратора. Световые колебания, попадая на фотоприемник Ф, преобразуются в электрические. Поворот на небольшой угол зеркала 3 или грани призмы, установленной перед объективом автоколлиматора, вызывает смещение центра автоколлимационного изображения марки относительно центра колебаний щели вибратора. В результате этого в фототоке появляется составляющая переменного тока с основной частотой колебаний. Амплитуда составляющей зависит от величины смещения, а фаза — от его направления. Составляющая выделяется и усиливается усилителем  $У_1$  и преобразуется в постоянное напряжение фазовым детектором ФД, с выхода которого напряжение подается на усилитель постоянного тока с интегрирующей цепью  $У_2$ . Напряжение с выхода усилителя  $У_2$  суммируется в обмотке вибратора с переменным напряжением, поступающим с генератора опорного напряжения Г. На катушку вибратора, кроме переменного, подается постоянное напряжение, пропорциональное смещению центра колебаний щели вибратора относительно центра изображения. С цифрового прибора ЦВ считывается показание пропорционально углу поворота зеркала. Так как вибратор выполняет также функции компенсатора, то для обеспечения высокой точности разработана специальная его конструкция. В зазоре постоянного магнита находится катушка, прикрепленная торцовыми

частями к тонкому стержню, концы которого в свою очередь прикреплены к двум плоским пружинам. Для повышения основных характеристик компенсатора магнит выполнен из сплава ЮНДК24, имеющего высокую коэрцитивную силу, а пружины — из бериллиевой бронзы Бр.Б2 с малым остаточным (упругим) последействием. Длина магнита, в котором перемещается катушка больше длины катушки, что позволяет уменьшить влияние краевых эффектов и получить однородное поле. Блок-схема установки показана на рис. 2. Механическая шторка 2 с приводом 5, установленная перед автоколлиматором 4, автоматически с необходимой частотой перекрывает поочередно грани исходной и поверяемой угловых мер 1. В качестве привода используется электромагнитное реле. Для управления работой шторки служит специальная схема связанная с системой блока автоматики. Установка работает следующим образом. Блок синхронизации 6 управляет приводом шторки, которая с задан-

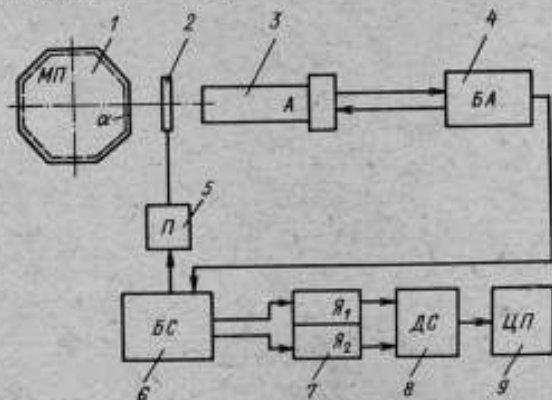


Рис. 2. Блок-схема установки

ной частотой перекрывает грани многогранников. В момент перекрытия в плоскости изображения формируется автоколлимационное изображение марки, а щель компенсатора автоматически наводится на эту марку, причем сигнал поступает из блока автоматики 4 через блок синхронизации в соответствующую запоминающую ячейку блока памяти 7 Я<sub>1</sub> или Я<sub>2</sub>. Таким образом, работа шторки синхронизирована с работой блока автоматики автоколлиматора и при открытии шторкой грани одной из призм в соответствующую запоминающую ячейку будет всегда поступать сигнал только от этой призмы. С дифференциальной схемы 8 на цифровой прибор 9 поступает разность двух сигналов, соответствующая измеряемому углу между гранями исходной и поверяемой многогранных призм. При перемещении шторки с заданной частотой компенсатор успевает отслеживать положение двух штрихов, которые могут отстоять друг от друга в пределах всего диапазона измеряемых углов. Для определения допустимой частоты перемещения шторки проведен динамический расчет системы автоматического наведения установки, включая и компенсатор.

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид

$$V(S) = \frac{k}{(T_1 S + 1)(T_2^2 S^2 + T_3 S + 1)}, \quad (1)$$

где  $k$  — коэффициент усиления по каналу перемещения изображения марки — перемещения щели вибратора;  $T_1 S + 1$  и  $T_2^2 S^2 + T_3 S + 1$  — полиномы, описывающие динамические свойства соответственно усилителя постоянного тока



вибратора;  $T_1$  — постоянная времени усилителя постоянного тока;  $T_2$  и  $T_3$  — постоянные времени вибратора.

Для передаточной функции замкнутой системы получим следующее выражение:

$$W(S) = \frac{V(S)}{1 + V(S)} = \frac{k}{T_1 T_2^2 S^3 + (T_1 T_3 + T_2^2) S^2 + (T_1 + T_3) S + k + 1} \quad (2)$$

Выражение (2) приводим к виду

$$W(S) = \frac{A}{S^3 + BS^2 + CS + D} \quad (3)$$

и далее

$$W(S) = \frac{A}{(S - C_1)(S - C_2)(S - C_3)} \quad (4)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  — корни уравнения,  $S^3 + BS^2 + CS + D = 0$ ,

$$A = \frac{k}{T_1 T_2^2}; B = \frac{T_1 T_3 + T_2^2}{T_1 T_2^2}; C = \frac{T_1 + T_3}{T_1 T_2^2}; D = \frac{k + 1}{T_1 T_2^2}$$

При поочередном наведении входное воздействие  $x(t)$  описывается выражением

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } 2nb < t < (2n+1)b, \\ 1 & \text{при } (2n+1)b < t < (2n+2)b, \end{cases} \quad (5)$$

где  $t$  — текущее время;  $b$  — полупериод входной величины;  $n = \left[ \frac{t}{2b} \right]$ .

Применив обратное преобразование Лапласа к передаточной функции (4), получим импульсную переходную функцию

$$\gamma(t) = L^{-1}[W(S)] = q_1 e^{C_1 t} + q_2 e^{C_2 t} + q_3 e^{C_3 t}, \quad (6)$$

где

$$q_1 = \frac{A(C_3 - C_2)}{(C_1 - C_2)(C_1 - C_3)(C_3 - C_2)}; q_2 = \frac{A(C_1 - C_2)}{(C_1 - C_2)(C_1 - C_3)(C_3 - C_2)};$$

$$q_3 = \frac{A(C_1 - C_2)}{(C_1 - C_2)(C_1 - C_3)(C_3 - C_2)}$$

Реакция системы на произвольное входное воздействие определяется выражением

$$Y(t) = \int_0^t \gamma(\tau) x(t - \tau) d\tau. \quad (7)$$

Введя члены  $t_1 = t - (2n+1)b$  и  $t_2 = t - 2nb$ , после соответствующих преобразований получим выражение, описывающее изменение выходной величины для системы автоматического наведения

$$Y(t) = \begin{cases} \sum_{j=1}^3 \frac{-q_j}{C_j} \left[ e^{C_j(t_1-b)} \left( \frac{e^{2C_j b} - e^{2C_j b(n+1)}}{1 + e^{C_j b}} \right) + 1 - e^{C_j t_1} \right] & \text{при } t > (2n+1)b \\ \sum_{j=1}^3 \frac{-q_j}{C_j} \left[ e^{C_j t_2} \left( \frac{1 - e^{2C_j b n}}{1 + e^{C_j b}} \right) \right] & \text{при } t > (2n+1)b. \end{cases} \quad (8)$$

Для параметров системы  $T_1=60$  с;  $T_2=2,3 \cdot 10^{-4}$  с и  $T_3=1,15 \cdot 10^{-4}$  с имеем  $k \approx 1000$ .

Выражение (8) приведем к виду

$$Y(t) = \begin{cases} e^{C_1(t-b)} \left[ \frac{e^{2C_2 b} - e^{2C_2 b(n+1)}}{1 + e^{C_2 b}} \right] + 1 - e^{C_2 t}, \\ e^{C_2 t} \left( \frac{1 - e^{2C_2 b n}}{1 + e^{C_2 b}} \right). \end{cases} \quad (9)$$

Для допустимой погрешности измерения  $\varepsilon=0,001$  величина  $b=0,41$  с, а частота перемещения шторки  $\omega=0,6$  с<sup>-1</sup>.

Основные погрешности измерения малых углов с помощью фотоэлектрической автоколлимационной установки вызваны нелинейностью характеристики компенсатора автоколлиматора, а также неточностью юстировки и изготовления многогранных призм [4, 5, 6]. Погрешность измерения из-за нелинейности характеристики компенсационного преобразователя обусловлена неоднородностью магнитного поля компенсатора и нелинейностью характеристик его упругой системы.

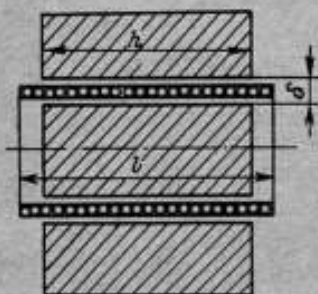


Рис. 3. Принципиальная схема магнитоэлектрической системы компенсатора

Принципиальная схема магнитоэлектрической системы компенсатора показана на рис. 3. Учитывая, что  $\frac{2\delta}{h} \ll 1$ , распределение магнитной индукции в зазоре постоянного магнита можно с достаточной точностью описать выражением

$$\pi \left( \left| x \right| - \frac{h}{2} \right) = \frac{1}{\beta} + \frac{1}{2} \ln \frac{1-\beta}{1+\beta}, \quad (10)$$

где  $x$  — координата направления перемещения катушки;  $h$  — толщина магнита;  $\delta$  — зазор, в котором перемещается катушка;  $\beta$  — относительная величина, характеризующая изменение магнитной индукции в зазоре постоянного магнита.

Запишем выражение для изменения суммарного потока, произывающего обмотку катушки при смещении ее на величину  $\rho$

$$\Delta \Phi = k \int_{-\frac{l}{2}}^{-\frac{l}{2} + \rho} \beta(x) dx - k \int_{\frac{l}{2} - \rho}^{\frac{l}{2}} \beta(x) dx, \quad (11)$$

где  $k$  — постоянный коэффициент;  $l$  — длина катушек;  $\beta(x)$  — величина, определяемая из выражения (10).

Учитывая, что  $\frac{2\rho}{l} \ll 1$ , можно вместо (11) использовать приближенное выражение

$$\Delta \Phi = k \left[ \int_0^{\rho} \left( \beta \frac{l}{2} + \frac{\partial \beta}{\partial x} \frac{l}{2} x \right) dx - \int_0^{\rho} \left( \beta \frac{l}{2} - \frac{\partial \beta}{\partial x} \frac{l}{2} x \right) dx \right], \quad (12)$$

которое после преобразования примет вид

$$\Delta\Phi = k \frac{\partial\beta}{\partial x} \rho^2. \quad (13)$$

Относительное изменение магнитного потока запишем следующим образом:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \frac{k \frac{\partial\beta}{\partial x} \rho^2}{k \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \beta(x) dx} \approx \frac{\rho^2 \frac{\partial\beta}{\partial x}}{l},$$

где  $\Phi$  — магнитный поток, действующий на обмотку при центральном положении катушки.

Продифференцировав обе части равенства (10) по  $x$ , найдем выражение для производной  $\frac{\partial\beta}{\partial x}$

$$\frac{\partial\beta}{\partial x} = -\frac{\pi}{\delta} \beta^2 (1 - \beta^2) \operatorname{sign} x \quad (15)$$

$$\operatorname{sign} x = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0, \\ -1 & \text{при } x < 0. \end{cases}$$

Подставив (15) в (14) и обозначив  $\eta_2 = \frac{\Delta\Phi}{\Phi}$ , получим

$$\eta_2 = \frac{\pi \rho^2 \beta^2 (1 - \beta^2) \operatorname{sign} x}{\delta l}. \quad (16)$$

Определим величину  $\eta_1$  для систем со следующими характеристиками: 1)  $\rho = 0,05$  мм,  $l = 5$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $h = 4$  мм. Определим  $\beta$  в точке  $\frac{l}{2\delta} = \frac{h}{2} = 0,5$  мм;

$\beta_{0,5} \approx 0,5$ , откуда  $\beta^2(1 - \beta^2) \approx 0,18$ , тогда  $\eta_1 = \frac{\pi \cdot 0,05^2 \cdot 0,18}{1 \cdot 5} = 2,8 \cdot 10^{-4} = 0,028\%$ .

2)  $\rho = 0,3$  мм,  $l = 4$  мм,  $\delta = 1$  мм,  $h = 5$  мм.  $\beta_{0,3} \approx 0,99$ ,  $\beta^2(1 - \beta^2) = 0,98 - 0,96 = 0,02$ , откуда  $\eta_1 = \frac{\pi \cdot 9 \cdot 0,02}{4 \cdot 10^3} = 0,00141 \approx 0,14\%$ .

Для расчета нелинейности прогиба пружины компенсатора можно использовать известное дифференциальное уравнение упругой линии гибкого стержня

$$\frac{M}{EI_x} = \frac{Y}{[1 + (Y')^2]^{3/2}}, \quad (17)$$

где  $M$  — изгибающий момент;  $E$  — модуль упругости;  $I_x$  — момент инерции в плоскости поперечного сечения пружины относительно горизонтальной оси  $x$ .

Проведя некоторые преобразования уравнения (17) и далее разложив полученное выражение в ряд, получим для максимального прогиба  $Y_1$  формулу

$$Y_1 = -\frac{Pl^2}{48EI} - \frac{P^2l^3}{35\,840(EI)^2} + C_2^*$$

где  $P$  — сила, приложенная к пружине;  $l$  — длина пружины.

Так как  $C_2 = 0$  из условия  $Y_2 = 0$  при  $P = 0$ , то, подставляя значение  $C_2$  и приняв относительную величину прогиба, получим выражение

$$\frac{Y_1}{l} = -\frac{Pl^2}{48EI_x} - \frac{P^2l^3}{35\,840(EI_x)^2} \quad (18)$$

Второй член в выражении (18), отнесенный к первому, и определит нелинейность прогиба пружины

$$\eta_2 = \frac{P^2l^3 \cdot 48EI}{35\,840(EI_x)^2 Pl^2} = \frac{P^2l^4}{740(EI_x)^2} \quad (19)$$

Из приближенного выражения  $\frac{Y_1}{l} = \frac{Pl^2}{48EI}$  найдем

$$P = \frac{Y_1 \cdot 48EI}{l^2} \quad (20)$$

В качестве примеров определим нелинейность для следующих случаев:

1)  $l = 30$  мм,  $Y_1 = 0,050$  мм,  $b = 6$  мм,  $h_1 = 0,1$  мм,  $b$  и  $h_1$  — ширина и толщина пружины.

$$I_x = \frac{bh_1^3}{12} = 0,0005 \text{ мм}^4; \quad E = 2,0 \cdot 10^7 \text{ гс/мм}^2;$$

$$EI_x = 1 \cdot 10^4 \text{ гс/мм}^2;$$

$$P = \frac{Y_1 \cdot 48EI_x}{l^2} = 0,9 \text{ гс};$$

$$\eta_2 = \frac{P^2l^4}{740(EI_x)^2} = 9 \cdot 10^{-6} = 0,9 \cdot 10^{-5};$$

2) для  $Y_1 = 0,3$  мм имеем  $P = 4,5$  гс,  $\eta_2 = 2,2 \cdot 10^{-4}$ .

Нелинейность при прогибе пружины 300 мкм составляет несколько более 0,02%. В качестве характеристики нелинейности магнито-электрического компенсатора можно принять сумму величин  $\eta_1$  и  $\eta_2$ . Для компенсатора с диапазоном работы 50 мкм имеем  $\eta = \eta_1 + \eta_2 = 0,028 + 0,001 = 0,029\%$  при диапазоне 300 мкм получим

$$\eta = 0,14 + 0,02 = 0,16\%.$$

В разработанном компенсаторе с максимальным перемещением щели 300 мкм (это соответствует диапазону работы в автоматическом режиме  $10''$ ), погрешность составила  $0,02''$ , т. е. нелинейность равна 0,2%. Высокое значение нелинейности по сравнению с расчетной обусловлено, по-видимому, гистерезисом, упругим последствием пружины и другими факторами, которые при расчете не учитывались.

Исследования фотоэлектрического автоколлиматора показали, что при измерении малых углов может появиться погрешность вследствие смещения граней угловой меры относительно объектива автоколлиматора. Для определения этой погрешности на ЦВМ был проведен расчет автоколлимационного изображения щели для различных участков плоского зеркального отражателя (рис. 4, а). Распределение освещенности в изображении от центрального участка зеркала (заштрихованный квадрат) принималось за начальное, а пара

метры изображений от других участков зеркала определялись по отношению к начальным. Характер изменения освещенности в автоколлимационном изображении, рассчитанном в приближении геометрической оптики, показан на рис. 4, б. За основные параметры распределения освещенности в изображении щели приняты максимальная относительная освещенность  $I_1$  и координата центра изображения  $z_1$ . Осями координат в плоскости отражателя являются

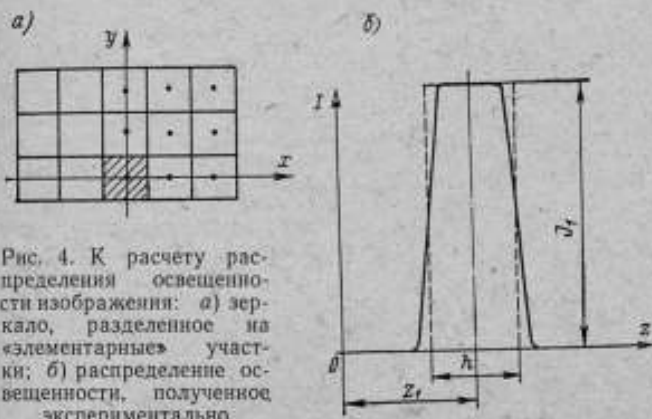


Рис. 4. К расчету распределения освещенности изображения: а) зеркало, разделенное на «элементарные» участки; б) распределение освещенности, полученное экспериментально

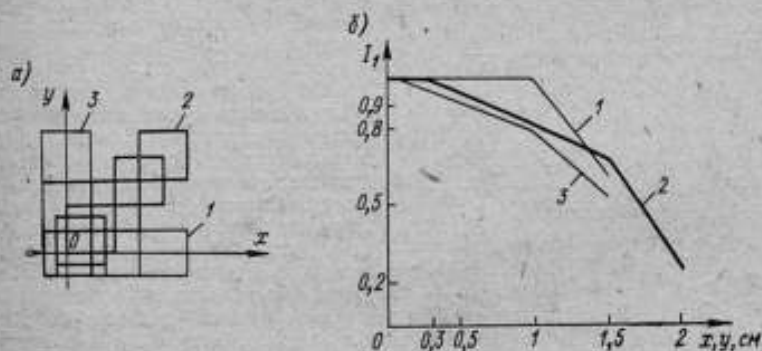


Рис. 5. К расчету максимальной освещенности изображения: а) различные случаи смещения зеркала в поле объектива автоколлиматора; б) зависимость максимальной освещенности изображения при смещении зеркала:

1 — в горизонтальном направлении вдоль оси  $x$ ; 2 — по диагонали; 3 — вдоль оси  $y$

$x$  и  $y$ . На рис. 5 приведены графики зависимости  $I_1 = f(x, y)$  для различных случаев смещений участка зеркала, построенные по результатам расчета на ЦВМ. На рис. 6 показаны расчетная и экспериментальная кривые зависимости  $z_1 = f(x, y)$  для случая смещения зеркала по диагонали отражателя.

Используя полученные расчетные данные, для любого плоского зеркала, установленного в определенном положении относительно объектива автоколлиматора, можно рассчитать в приближении геометрической оптики распределение освещенности в изображении щели, если рассматривать его как сумму



распределений освещенности в изображениях, полученных от «элементарных» зеркал, на которые может быть разбита реальная отражающая поверхность. Для упрощения расчета можно принять, что изображение от «элементарного» участка зеркала имеет вид прямоугольного (см. рис. 4, б), тогда

$$I(x, y, h) = \begin{cases} I_1, & \text{при } |z - z_1| \leq \frac{h}{2}, \\ 0, & \text{при } |z - z_1| > \frac{h}{2}. \end{cases} \quad (21)$$

где  $z$  — координата в плоскости изображения;  $h$  — ширина изображения щели;  $z_1 = \Phi_1(x, y)$ ;  $I_1 = \Phi_2(x, y)$  (функции  $\Phi_1(x, y)$  и  $\Phi_2(x, y)$  получены предварительным расчетом на ЦВМ и приведены в таблице).

Общее распределение освещенности в автоколлимационном изображении от произвольного плоского зеркала имеет вид

$$I_{\Sigma}(z) = \sum_{i=1}^n I(x_i, y_i, h, z) \alpha_i \quad (22)$$

где  $\alpha_i$  — коэффициент, учитывающий соотношение площадей «элементарных» зеркал, коэффициенты отражения;  $n$  — число элементарных зеркал, на которые разделены отражатель;  $i$  — номер «элементарного» зеркала.

По полученному суммарному распределению освещенности в изображении с помощью известных расчетных методов можно определить погрешность измерения угла [4]. При экспериментальных исследованиях, проводившихся одновременно с расчетом, отражатель смещался параллельно в плоскости его установки относительно центра объектива (см. рис. 5). При смещении грани призмы на 5 мм изменение показаний прибора может достигать  $0,25''$ , поэтому для обеспечения необходимой точности изме-

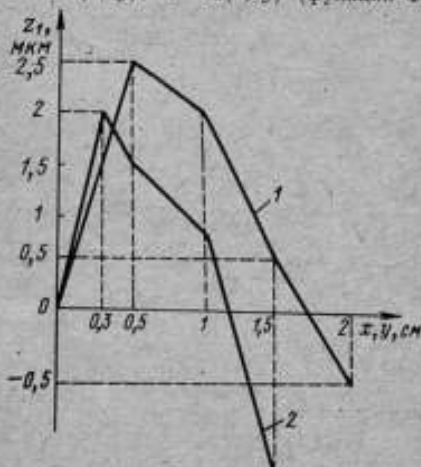


Рис. 5. Зависимость изменения центра изображения от смещения зеркала по диагонали:

1 и 2 — расчетная и экспериментальная кривая соответственно

рис. 5). При смещении грани призмы на 5 мм изменение показаний прибора может достигать  $0,25''$ , поэтому для обеспечения необходимой точности изме-

$x$ , см	$y$ , см	$\Phi_1$ , мм	$\Phi_2$ , отн. ед.
0	0	0	1
0,3	0	1,5	1
0,3	0,3	1,5	1
0,5	0,5	2,5	0,96
1	0	3	1
0	1	0	0,82
1	1	2	0,82
1,5	1,5	0,5	0,66
0	2	0	0,52
2	0	2	0,60
2	2	-0,5	0,23

рения углов призма должна устанавливаться на столике таким образом, чтобы центр грани был смещен относительно центра объектива автоколлимационного прибора не более чем на 2 мм. Кроме того, длины граней одной призмы не должны отличаться более чем на 1 мм.

Как показали эти исследования, влияние других факторов на точность измерений может быть сведено к минимуму. С помощью установки была проведена аттестация большого числа образцовых многогранных призм с различным числом граней.

Среднее квадратическое отклонение результата измерений не превысило  $0,09''$ . Доверительная погрешность при доверительной вероятности 0,997 составляет  $\pm 0,27''$ . Все это позволяет сделать выводы, что разработанная установка обладает высоким быстродействием и позволяет повысить производительность измерений по сравнению с установками с визуальным отсчетом показаний, по крайней мере в 10 раз. Посредством ее можно проводить сравнение и калибровку многогранных призм с любым числом граней. Установка может быть использована для аттестации многогранных призм 1-го и 2-го разрядов с погрешностью, не превышающей  $\pm 0,3''$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуславский М. Г. и др. Автоматическое устройство для поверки образцовых многогранных призм. «Измерительная техника», 1975, № 3, с. 36—37.
2. Вольперт В. Ц. и др. Автоколлимационная установка для поверки образцовых многогранных призм. Изд. ЛДНТП. «Опыт внедрения прогрессивных методов и средств контроля качества», 1975, с. 74—77.
3. Богуславский М. Г. и др. Высокочувствительный фотоэлектрический автоколлиматор с автоматическим наведением. «Измерительная техника», 1973, № 6, с. 25—26.
4. Вольперт В. Ц. и др. Влияние изменения распределения освещенности в изображении марки на точность измерений фотоэлектрического автоколлиматора. «Оптико-механическая промышленность», 1973, № 8, с. 69—70.
5. Вольперт В. Ц. Смещение центра наведения фотоэлектрического автоколлиматора при отражающей поверхности с известной неплоскостью. «Измерительная техника», 1973, № 5, с. 28—30.
6. Вольперт В. Ц. и др. Метод расчета распределения освещенности в автоколлимационном изображении щели при отражающей поверхности с известным отступлением от плоскости. «Оптико-механическая промышленность», 1972, № 11, с. 6—9.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.74.748 : 389.001.5

В. В. Копытов, В. Д. Лизунов

СНИИМ

### АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ ПРИБОР ДЛЯ КАЛИБРОВКИ МНОГОГРАННЫХ ПРИЗМ

При аттестации многогранных призм применяют два метода измерений: абсолютный метод (калибровка) и сравнительный (сличение). В первом случае обычно применяются два автоколлиматора [1], во втором — один [2]. В настоящее время создан ряд высокоточных приборов для поверки с объективным фотоэлектрическим наведением и отсчетом, автоматизацией процесса измерений [3, 4, 5].

Авторами разработан и исследован прибор для калибровки призм с равномерным угловым шагом с помощью только одного автоколлиматора, в поле

зрения которого формируют автоколлимационные изображения марки от двух граней одновременно. Положения автоколлимационных штрихов регистрируются фотоэлектрическим методом.

Прибор включает в себя автоколлиматор (АК), прямоугольный отражатель, зеркало и устройство для размещения и поворота призм. На рис. 1 приведена оптическая схема прибора. Часть светового потока автоколлиматора 1 направляют на одну из граней призмы 3 (грань I). Другую часть — зеркалом 5, закрепленным на оси, через прямоугольный отражатель 2 направляют на другую грань (грань V). Поворотом призмы вводят автоколлимационное изображение от грани I в неподвижный биссектор. Автоколлимационное изображение от грани V вводят в биссектор с помощью отражателя 2 и зеркала 5, которые кинематически связаны таким образом, что при повороте отражателя на угол  $2\varphi$ , зеркало поворачивается на угол  $\varphi$ .

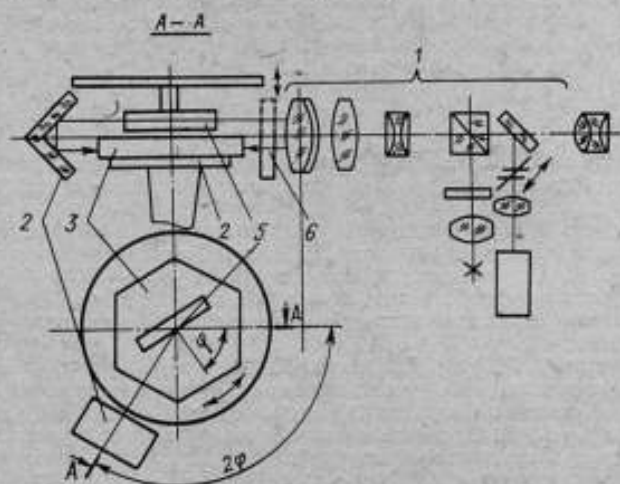


Рис. 1. Автоколлимационный прибор для калибровки многогранных призм с одним автоколлиматором

В качестве приемно-преобразовательной системы может быть применен любой АК. Здесь применен фотоэлектрический АК типа АФ-2. Фиксацию одной грани призмы производят фотоэлектрическим способом, а измерение углового отклонения изображения от второй грани в поле зрения АК производят с помощью отсчетного устройства АК. Для поочередного перекрытия светового потока, направленного к граням призмы, служит шторка б.

При исследовании прибора использовались многогранные призмы, по своим характеристикам удовлетворяющие требованиям ГОСТ 2875-74: рабочий эталон—36-гранная кварцевая призма № 4-71 класса 00 и металлические 40-гранная призма № 001 и 18-гранная № 007 класса 0.

При определении погрешности измерения прибора учитывались помехи от поворотного устройства. Одним из основных требований, предъявляемых к поворотным устройствам, является постоянство углового положения призм относительно оси вращения, которое зависит от исполнения шпиндельного узла, биения шпинделей и возможного заклинивания конусов-подшипников скольжения.

Для уменьшения погрешности шпиндельный узел был выполнен в виде конического подшипника скольжения с шаровой регулируемой опорой.

Исследования устойчивости положения оси шпинделя проводились по наблюдениям смещений изображения автоколлимационной марки в вертикаль-

ной плоскости от граней 40-гранной призмы. Показания АК фиксировались при последовательном повороте призмы на угловой шаг от двух полных оборотов в прямом и обратном направлениях. Вариация (размах) показаний АК при периоде  $360^\circ$  и повторяемость показаний при периоде  $720^\circ$  показали, что распределение смазки по поверхностям контакта неравномерно. Распределение смазки на поверхностях металла можно представить моделью, изображенной на рис. 2. Примем, что точка  $a$  одного слоя смазки связана с движущейся поверхностью, а точка  $b$  другого слоя — с неподвижной поверхностью. После того как поверхность с точкой  $a$  переместится на отрезок  $aa_1$ , некоторая точка  $O$  в середине зазора, наполненного смазкой, переместится в точку  $O_1$ .

Из геометрического построения вытекает, что

$$OO_1 = \frac{aa_1}{2},$$

т. е. середина всего слоя смазки движется вдвое медленнее, чем подвижная часть. Это явление, а силу давления масла, и вызывает колебания разности отсчетов с периодом  $720^\circ$ .

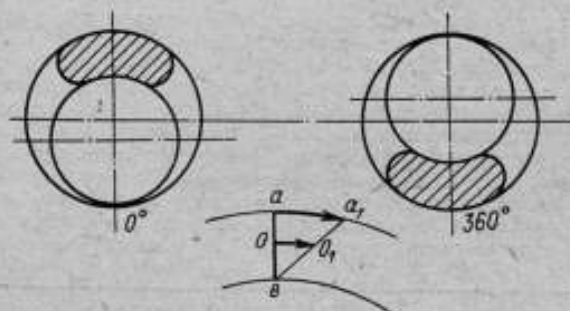


Рис. 2. Модель распределения смазки на поверхностях контакта шпиндельного узла

При использовании консистентных смазок типа ШИАТИМ-201 колебания разности отсчетов (вертикальное направление) с периодом  $360^\circ$  достигало  $5''$ . Применение жидкотекучих смазок типа АУ (масло веретенное), ГОСТ 1642—50, позволило уменьшить эту величину до  $1''$ . Погрешность измерения из-за неравномерности смазки может составить [4]:

$$|\Delta\varphi| = \frac{\gamma_{\max} \beta_{\max} \cdot 2\pi}{1\,296\,000},$$

где  $\gamma_{\max} = 1''$  — максимальное отклонение плоскостей граней от фиксированной плоскости;  $\beta_{\max} = 30''$  — максимальный угол наклона автоколлимационной марки относительно щели при юстировке с помощью оптического квадранта КО-30:

$$|\Delta\varphi| = 0,0002''.$$

Уменьшить это влияние можно путем усреднения результатов наблюдений при двух оборотах шпинделя с призмой.

К недостаткам шпиндельных узлов можно отнести нестабильность положения шпинделя после прекращения действия нагрузки, вызываемая упругой деформацией узла: червяка и шпинделя с жестко посаженным на нем червячным колесом. Шпиндель и червячное колесо были «развязаны». Установка плавающей муфты позволила передавать от привода на шпиндель только вращающий момент. Многократные измерения, проведенные с помощью АК и

призмы, показали, что шпindel сохраняет постоянно положение после пре-  
 вращения действия нагрузки.

Калибровка производится следующим образом. Призму устанавливают на  
 столике 4 (рис. 1) поворотного устройства так, чтобы ее грани были парал-  
 лельны оси вращения. Затем определяют разность отсчетов от первой пары  
 граней, поворачивают призму с помощью поворотного устройства на угловой  
 шаг и определяют следующую разность отсчетов и т. д. до 360°. Второй прием  
 измерений: прямоугольный отражатель перемещают по круговой направляю-  
 щей на угловой шаг призмы, а зеркало соответственно на половину шага и  
 закрепляют систему. Измерения производят в том же порядке, что и в пер-  
 вом приеме. Результаты измерений обрабатывают по методу «разностей» [1,  
 2]. Вследствие потерь света, проходящего через блок зеркал, автоколлимаци-  
 онное изображение марки от грани V несколько отличается от изображения  
 от грани I. Путем многократных наблюдений было определено влияние нерав-  
 номерности освещенности на погрешность измерения. Поскольку освещенность  
 влияет в основном только на чувствительность фотоэлектрического отсчетного  
 устройства, была определена погрешность наведения на штрих при разных  
 условиях освещенности. Среднее квадратическое отклонение ряда измерений  
 составило 0,021" в обоих случаях.

Это позволяет считать, что погрешность наведения при различной осве-  
 щенности практически не влияет на погрешность измерений.

Систематическая погрешность измерений частично исключается методикой  
 обработки измерений (метод «разностей»). Кроме того, погрешность можно  
 выявить путем измерения углов призмы с известными отклонениями.

Калибровка кварцевой призмы № 4-71 при девяти сериях измерений по-  
 казала, что среднее квадратическое отклонение результата измерений (угол  
 2φ изменился от 20° до 180°) не превышает 0,07". Расхождения с резуль-  
 татами калибровки, полученными на установке с двумя автоколлиматорами,  
 в основном находятся в пределах доверительного интервала [ $x+0,3"$ ,  
 $x-0,3"$ ] при доверительной вероятности 0,99 (см. табл.). При калибровке

Номинальное значение угла, °	Действительное значение отклонения угла от номинального, "		$\Delta = \bar{x}'_i - \bar{x}_i$
	Калибровка с использо- ванием одного АК и блока зеркал	Калибровка с использо- ванием двух авто- коллиматоров	
	$\bar{x}'_i$	$\bar{x}_i$	
20	-0,20	-0,22	+0,02
40	-0,42	-0,35	-0,07
60	-0,20	-0,03	-0,17
80	-0,27	-0,27	0
100	+0,22	+0,42	-0,20
120	-0,48	-0,41	-0,07
140	+0,61	+0,56	+0,05
160	+0,84	+0,79	-0,05
180	+0,77	+0,86	-0,08
200	-1,36	-1,49	+0,13
220	-0,48	-0,42	-0,06
240	+0,06	-0,01	+0,07
260	+0,48	+0,39	+0,09
280	-0,65	-0,79	+0,14
300	-2,63	-2,60	-0,03
320	-1,38	-1,44	+0,06
340	-2,19	-2,17	-0,02
360	0	0	0



металлической призмы № 007 установлено, что отклонения результатов измерения от значений по аттестату не превышают  $0,3''$ .

Прибор позволяет производить аттестацию угловых плиток методом сличения с углом, образованным осью  $AK$  и направлением от центра вра-

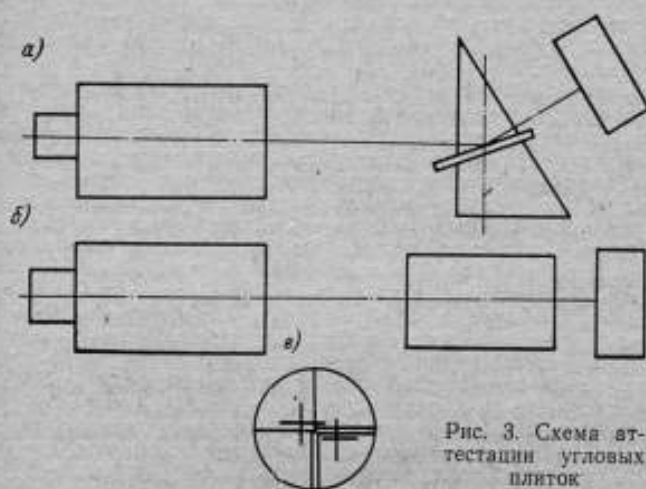


Рис. 3. Схема аттестации угловых плиток

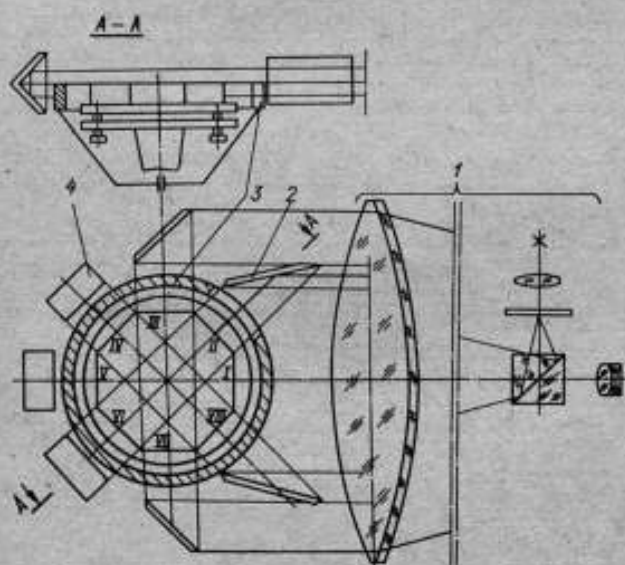


Рис. 4. Устройство для контроля параметров угловых плиток и призм

щения шпинделя поворотного устройства к отражателю. Указанный угол (рис. 3, а) устанавливают с помощью образцовой меры с учетом отклонения от номинального значения. Установив поверяемую меру, производят измерения. Для определения непараллельности, например рабочих поверхностей

концевых мер длины, отражатель предварительно устанавливается строго против АК. Затем на столик устанавливают меру (рис. 3, б) вращением столика совмещают в поле зрения (рис. 3, в) автоколлимационные изображения от торцов мер и определяют отклонение.

Следует отметить нечувствительность схемы к неточности установки прямоугольного отражателя в плоскости, проходящей через ось вращения призмы. Поэтому можно собрать прибор на базе гониометра или оптической делительной головки.

Прибор при сравнительно простой и компактной конструкции позволяет повысить точность поверки призм и производительность процесса измерений. Не вызывает затруднений автоматизация калибровки призм по принципу, изложенному в работе [5], где автоколлимационные ветви от двух граней сведены в одном автоколлиматоре.

По такому же принципу возможно создание устройства для контроля параметров угловых плиток и призм в процессе изготовления. Отличие предлагаемого устройства состоит в том, что световой поток автоколлиматора 1 (рис. 4) с помощью зеркал 2 и прямоугольных отражателей 4 направляют одновременно на все рабочие поверхности меры. Если зеркала отъюстировать по образцовой мере, а в поле зрения АК обозначить поле допуска, то установка поверяемой меры, можно получить информацию обо всех отклонениях одновременно.

Для получения автоколлимационного изображения отдельно от каждой грани может служить кольцевой экран 3 со щелью (диафрагма). Преимущество устройства в том, что измеряемый объект (призма) и регистрирующий прибор (АК) находятся в относительной неподвижности, что позволяет исключить погрешность от поворотного устройства.

Описанные устройства могут быть использованы для аттестации угловых плиток, призм или изделий с отражающими гранями путем сличения с образцовой мерой, а также для определения непараллельности, например, рабочих поверхностей концевых мер длины сравнением с углом  $180^\circ$ .

Предлагаемый автоколлимационный прибор благодаря относительно малой погрешности ( $S=0,07''$ ) может применяться в качестве образцового прибора для калибровки призм 1 разряда.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гречко М. Ф., Смирнова Л. И., Стракун Г. И., Шарова Е. Е. Эталонная установка для измерения углов.— «Труды институтов Комитета стандартов», вып. 47 (107), М.—Л., Стандартгиз, 1961, с. 127—130.
2. Эйдинов В. Я. Измерение углов в машиностроении. М., Стандартгиз, 1963, 350 с.
3. Богуславский М. Г., Элиашберг В. М., Шарова Е. Е., Федотова А. И. Государственный первичный эталон единицы плоского угла—радиана.— «Измерительная техника», 1972, № 7, с. 9—11 с ил.
4. Богуславский М. Г., Шарова Е. Е., Элиашберг В. М. Эталонная установка для калибровки многогранных призм. Авт. свид. № 266236. «Бюлл. изобр.», 1970, № 11.
5. Богуславский М. Г., Вольперт В. Ц., Элиашберг В. М. Автоматическое устройство для сличения многогранных призм.— «Измерительная техника», 1975, № 3, с. 36—38 с ил.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗЦОВЫХ УСТАНОВОК  
ДЛЯ ПОВЕРКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН  
В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В последние годы возросли требования к точности приборов, применяемых для измерения и контроля переменных линейных размеров. Стало необходимым определять метрологические характеристики приборов в условиях эксплуатации, так как результаты, получаемые в статическом режиме работы прибора, далеко не полностью характеризуют действительную точность приборов (табл. 1).

Во ВНИИМ создан ряд образцовых средств для поверки приборов, работающих в динамическом режиме. Характеристики созданных средств приведены в табл. 2 [1].

Установка УД-1 предназначена для поверки приборов с непрерывным и дискретным выходными сигналами в широком диапазоне частот и амплитуд. Конструкция кулачкового узла установки позволяет изменять амплитуду колебания в пределах от 2 до 100 мкм. Установка имеет местную термозащиту, что позволяет применять ее в нетермостатированных помещениях. Схема установки УД-1 представлена на рис. 1. Интерферометр 1, смонтированный в корпусе, выполнен по схеме Майкельсона и включает в себя систему наблюдения 3, разделительную пластину 2, неподвижное зеркало 15, установленное в корпусе, подвижное зеркало 4, жестко связанное со столиком 6, и источник света 16. В динамическом режиме работы установки в качестве источника света используется лампа, электрически связанная с блоком регулируемой частоты 13, а в квазистатическом — накальная лампа. Столик 6, закрепленный на упругих подвесах, соединен с рычагом 14 через упор 5. На конце рычага размещен вспомогательный кулачок 11, опирающийся на основной кулачок 12. Кулачки вращаются от электродвигателей 9 и 10. Поверяемый преобразователь электрически связан с двигателем 9 через релейный командный блок 8.

Установка работает следующим образом. Столик 6 получает одновременно два независимых движения: по гармоническому закону (с заданной частотой и амплитудой) — от кулачка 12 и медленное — от кулачка 11. Одновременно со столиком перемещаются жестко связанное с ним подвижное зеркало 4 и измерительный шток поверяемого преобразователя 7.

Для поверки предельного преобразователя столик 6 выводится при помощи основного кулачка 12 в одно из крайних положений, в зависимости от контактной пары поверяемого преобразователя. Затем включается электродвигатель 9 вращения вспомогательного кулачка до замыкания проверяемой пары. При замыкании контактов двигателя вспомогательного кулачка останавливается и производится отсчет, соответствующий статическому режиму. Затем с помощью двигателя 10 устанавливается динамический ре-

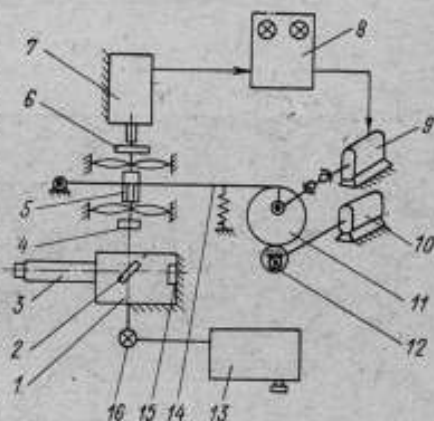


Рис. 1. Схема установки для поверки в динамическом режиме

Таблица 1

Наименование прибора	Тип, модель	Цена деления шкалы или шаг прибора, мкМ	Пределы измерения, мм	Погрешность в статическом режиме, мкМ	Погрешность в динамическом режиме или в условиях эксплуатации, мкМ
Преобразователи электродных * ГОСТ 3899-68	228	2	0-3	0,5 (размах срабатывания)	$\delta_d = 1$ мкМ (при $\nu = 20$ Гц, $A_0 = 10$ мкМ)
Приборы активного контроля при круглом шлифовании одноконтатные	БВ-4092 БВ-4093 БВ-4100 БВ-4116 БВ-6060 АК-3М	3 5 0,5 ± 1	0 ± 300 0 ± 320	1 ± 2 1 ± 1,5	$\delta_3 = 20$ $\delta_5 = 5 \div 15$
Приборы самонипушущие ** ГОСТ 10383-63	БВ-3023 226	10	0 ± 320 Масштаб увеличения 100 : 1 ± 10000 : 1	3 ± 3% от амплитуды записи	$\delta_3 = 20$ Чувствительность 0,56 и 0,98 от номинальной соответствующей на частотах 6 и 10 Гц $\delta_d = 3,5$ мкМ (при $\nu = 2$ Гц, $A_0 = 10$ мкМ $\delta_4 = 7,5$ мкМ при $\nu = 6$ Гц, $A_0 = 10$ мкМ)
Преобразователи пневмоэлектронные ***	235 249	2	0-3	0,5	

\* С реле, модель 238.

\*\* По результатам испытания одного прибора.

\*\*\* Для контактной части.

Таблица 2

Установки для проверки в динамическом и квазистатическом режимах	Поверяемые приборы	Режимы гармонических колебаний		Номинальная цена деления, мкм	Суммарная погрешность в динамическом режиме, мкм
		частота, Гц	амплитуда, мкм		
УД-1	Самопишущие приборы: рычажно-зубчатые, пружинные головки Электроконтактные и пневмоэлектроконтактные преобразователи	1—45	0—100	0,1	0,3
УДП-1	Электроконтактные предельные преобразователи	1,5; 5; 10; 20	10	0,1	0,2
УДА-1	Электроконтактные амплитудные преобразователи	1,5	20		0,2*
УДП-2	Приборы с дискретным выходным сигналом	1—45	0—100	0,05; 0,1	0,2**
Н-1 (накладки к установке УД-1 для скользящих и одноконтактных приборов)	Приборы активного контроля: пневматические, индуктивные, механические (сигнальные и показывающие)	1—45	0—100	0,1	0,3

\* Цифровой отсчет погрешности.

\*\* Фотоотсчет.

режим и включается двигатель 9 вспомогательного кулачка. Результирующее движение столика представляет собой синусоиду, положение оси которой определяется вспомогательным кулачком. При замыкании контактной пары двигатель вспомогательного кулачка останавливается и производится отсчет в динамическом режиме при стробировании интерференционной картины по крайнему положению ахроматической полосы, либо в квазистатическом режиме при повороте основного кулачка в соответствующее экстремальное положение.

Другие модификации установки менее универсальны и предназначены для проверки более узкой группы приборов, что дает возможность автоматизировать отдельные операции, значительно повысив производительность проверки или помехоустойчивость установки. Так, в установке УДА-1 погрешность поверяемого прибора выражается непосредственно в цифровом виде. При использовании установки УДП-2 показания образцового интерференционного устройства фиксируются на фотопленке, что дает возможность применять ее при значительных вибрационных помехах. Установки могут работать и в квазистатическом режиме как поверочные полуавтоматические средства, при этом узел динамического режима отключается.

Для оценки погрешностей установок, работавших в квазистатическом, и динамическом режимах, проводилось теоретическое и экспериментальное исследование, касавшееся наиболее ответственных функциональных элементов. Например, для установки УД-1 получены следующие результаты исследований.



1. В местах соприкосновения подвижной системы с рычагом и рычага с кулачком возможен отрыв звеньев измерительной цепи. Но так как критическая частота отрыва значительно превышает рабочую частоту колебания, отрыва не происходит.

2. Для определения погрешностей воспроизведения гармонического закона колебания следует расчитать имеющуюся в установке передачу кулачок—столлик на два звена. Погрешность воспроизведения для первого звена

$$\delta_{ac} = \frac{\epsilon}{L} \cos^2 \frac{\epsilon}{2},$$

где  $\epsilon$  — эксцентриситет,  $L$  — длина шатуна эквивалентного механизма,  $\epsilon$  — угол поворота кривошипа эквивалентного механизма [4].

После подстановки значений этих величин получаем  $\delta_{ac} = 0,25\%$ . Погрешностями второго звена (при передаче эксцентрик—рычаг и рычаг—столлик), вследствие малости амплитуды колебания, можно пренебречь. Исследования показали, что коэффициент нелинейных искажений не превышает 3%.

3. При длине волны  $\lambda = 0,54$  мкм погрешности измерения длины волны  $\Delta\lambda = 0,002$  мкм и цене деления  $i = 0,1$  мкм погрешность интерференционного устройства равна  $\delta_a = \pm 0,06$  мкм.

4. Определена погрешность  $s_r$ , вызванная гистерезисными явлениями. Для этой цели столлик установки вначале нагружался, а затем груз снимался. За погрешность  $s_r$  принималась разность между показаниями до и после нагружения. Получено  $s_r \approx 0,02$  мкм.

5. Найдена погрешность, вызываемая колебаниями измерительного усилия  $\delta_Q$ . Вначале определялась чувствительность к нагружению  $\rho = \frac{\Delta N}{Q}$ ,

где  $\Delta N$  — изменение показаний,  $Q$  — нагрузка на стол. Полученная зависимость  $\Delta N(Q)$  линейна в пределах  $Q = 500$  сН. Погрешность составила  $\delta_Q \approx \pm 0,05$  мкм.

6. Определены погрешности порождения столлика в экстремальных точках:  $s_n \approx 0,03$  мкм.

7. При исследовании температурных погрешностей имитировались температурные условия в цехах и других производственных помещениях. Измерялась температура снаружи и внутри установки и определялись показания интерферометра. Полученный температурный коэффициент  $k_T = \frac{\Delta N}{\Delta T} \approx$

$\approx 0,4$  мкм/град, что соответствует температурной погрешности  $\delta_T \approx 0,1$  мкм.

Таким образом, суммарная систематическая погрешность установки составляет  $\delta \approx \pm \sum |\delta_i| = 0,3$  мкм, случайная  $s = \sqrt{\sum s_i^2} \approx 0,04$  мкм. В статическом режиме погрешность установки не превышает 0,2 мкм.

На установках были исследованы динамические характеристики приборов, серийно выпускаемых отечественной промышленностью: электроконтактных преобразователей (предельных и амплитудных) моделей 228, 229, 233, 248 самопишущих приборов моделей 226 и БВ-662 [1], рычажно-зубчатых и пружинных головок, ротаметров, пневмоэлектроконтактных преобразователей. Введение в установку специальных наладок И-1 позволяет испытывать также приборы активного контроля (пневматические, индуктивные, механические) [3].

На установке УД-1 проводятся поверки в динамическом и статическом режимах при приемочных или контрольных госиспытаниях. В табл. 2 сведены результаты испытаний серийных отечественных приборов. На основании экспериментов выделены три основные зоны работы приборов в зависимости от их амплитудно-частотной характеристики  $\mu(\nu)$  (табл. 3): зона А ограничена областью частот, где  $(1 - \mu(\nu)) \leq 0,15$ , зона С — областью где  $\mu(\nu) \leq 0,15$ , между двумя этими зонами располагается зона В.

Таблица 3

Приборы	Тип, модель	Зона частот А, Гц	Зона частот С, Гц
Пневмоэлектроконтактный преобразователь	235, 249	1,7	17
Электроконтактная пружинная головка	ЭДП	2	30
Пружинная головка	ИГП	2	30
Индуктивный ПАК с навесной скобой	АК-3М	до 1	5
Индуктивный ПАК с настольной скобой	БВ-4100	1,5	4,5
Пневматический ПАК одноконтактный	БВ-4092	2	20
Пневматический длиномер (ротаметр)	316	0,7	3

В результате исследований разработан проект поверочной схемы для приборов, работающих в динамическом режиме; в расширенном виде эта схема представлена на рис. 2. Как видно, погрешности разработанных установок соответствуют 4—5-му разрядам.

В ближайшие годы предполагается создать комплекс образцовых установок повышенной точности (до уровня 3-го разряда). Большое внимание при этом следует уделить разработке, исследованию и аттестации образцовых измерительных приборов, предназначенных для сличения образцовых установок. В ряде случаев в основу этих приборов могут быть положены уже известные конструкции.

Наряду с динамическими факторами существенное воздействие на приборы оказывают вибрации. При работе приборов в условиях вибраций возникают инерционные силы, влияющие на метрологические характеристики. Во ВНИИМ разработан комплекс устройства к вибростендам, предназначенным для испытаний большинства серийных приборов и преобразователей небольших габаритов. Разработан комплекс приспособлений к вибростендам, позволяющих испытывать показывающие приборы.

На рис. 3, 4 представлены устройства для испытания измерительных головок с посадочными диаметрами 8 и 28 мм, моделей ИГП, ИЧ, МИГ, ЭДП и др., а также электроконтактных преобразователей ЭКП. Устройства обеспечивают надежное крепление приборов при испытании в диапазоне частот 10—1000 Гц и виброускорений до  $W=2,5-3g$ . Устройства в совокупности со специальным кронштейном позволяют испытывать приборы в трех взаимно перпендикулярных плоскостях относительно оси вибростенда. Узлы тонкого перемещения устройств обеспечивают пределы регулирования до 100 мкм — для приборов с диаметром 28 мм и до 15 мкм — для приборов с диаметром 8 мм. Минимальное пороговое значение тонкого перемещения 0,1—0,2 мкм и 1—2 мкм соответственно. Устройства просты и удобны в эксплуатации.

Особое внимание следует обратить на крепление приборов с присоединительным размером 8 мм. При сильном зажиме на малой площади цапфа, упруго деформируясь, жестко фиксирует измерительный стержень, в случае недостаточного зажима головка перемещается от вибраций в направлении действия гравитационных сил. Методика испытаний и критерии оценки подробно рассмотрены в [5].

Поскольку используемые на практике образцовые средства сами реагируют на вибрационные возмущения, то это учтено при разработке установки для поверки ЭКП в условиях вибраций. Для этой цели был использован пневматический бесконтактный метод измерения. На рис. 5 показано устройство, реализующее этот метод. Механизм, задающий перемещение измерительному стержню испытываемого прибора, одновременно изменяет зазор между торцом сопла 5 и заслонкой (рамкой 4).

Пневматический метод позволяет получить высокую точность при отсутствии вибрационных возмущений и сохранить ее в условиях вибраций.

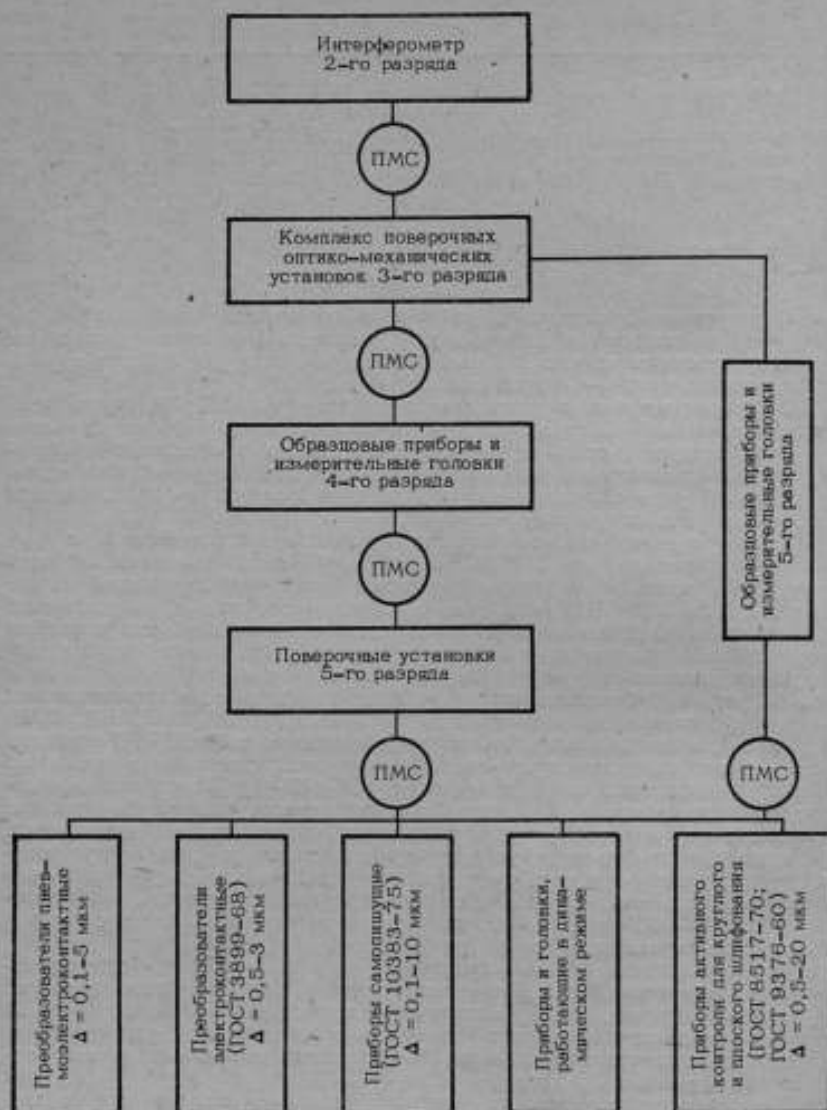


Рис. 2. Поверочная схема для средств измерения длин в динамическом режиме

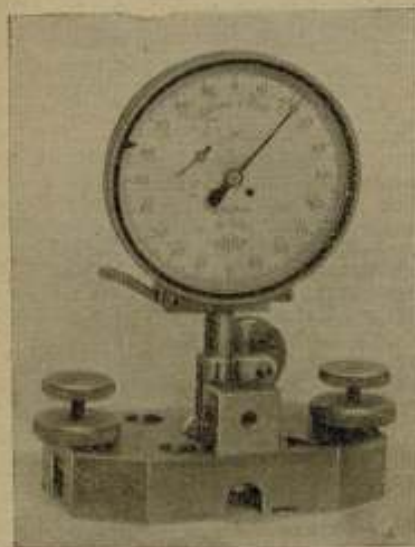


Рис. 3. Устройство для испытания рычажно-зубчатых измерительных головок



Рис. 4. Устройство для испытания пружинных измерительных головок

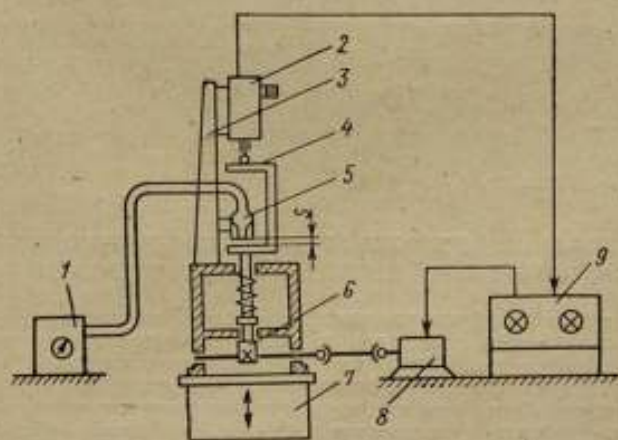


Рис. 5. Схема устройства для испытания виброустойчивости преобразователей

На вибростенде 7 установлена стойка 3 с поверяемым преобразователем 2. Образцовым средством служит сопло 5, связанное шлангом с отсчетным пневматическим устройством 1. Квазистатическое перемещение задается от кулачка 6 приводом 8. При срабатывании ЭКП привод, управляемый реле 9, останавливается, и производится отсчет.

Исследования установки показали, что ее погрешность  $\Delta = 0,3$  мкм (при ускорении  $W \leq 3g$  в диапазоне частот  $\nu$  до 1000 Гц), что удовлетворяет требованиям поверки ЭКП, у которых погрешности в условиях вибраций  $\delta \geq 1$  мкм. Как показали испытания установки, систематические погрешности ЭКП при  $W = 1,5g$  и  $\nu = 200$  Гц составляют 3—5 мкм, что существенно превышает допустимое значение. Применение таких приборов на станках и автоматических линиях могло быть причиной брака. Введение соответствующих поправок позволит частично компенсировать эти погрешности.

Если прибор состоит из первичного преобразователя и отсчетно-командного устройства, оформленного в виде отдельных блоков, то испытания на виброустойчивость обычно проводятся поочередно для первичного преобразователя и отсчетно-командного устройства. Это облегчает выявление возможного источника погрешностей от вибраций.

Разработанные установки и методы использовались при проведении испытаний, поверке и исследовании различных приборов и преобразователей, серийно выпускаемых отечественной промышленностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богуславский М. Г., Мионов Ю. С., Анучин Е. П. Определение динамических характеристик самопишущих приборов для измерения длин.— «Измерительная техника», 1971, № 4, с. 14—15.
2. Богуславский М. Г., Мионов Ю. С., Анучин Е. П. Установка для поверки в динамическом режиме электроконтактных преобразователей линейных размеров.— «Измерительная техника», 1974, № 10, с. 26—27 с ил.
3. Абрамова Л. Ю., Мионов Ю. С. Метрологическая оценка динамической точности приборов, встраиваемых в станки, «Метрология», 1974, № 10.
4. Ротбарт. Кулачковые механизмы. М., Машгиз, 1960.
5. Мионов Ю. С. Определение виброустойчивости шкальных приборов для линейных измерений.— «Измерительная техника», 1969, № 4, с. 15—17.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 681.2-752

С. Б. Тарасов

вним

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ РЫЧАЖНО-ЗУБЧАТЫХ И ПРУЖИННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Приборы для линейных измерений в отличие, например, от радиоэлектронной аппаратуры не рассчитаны для работы в условиях вибраций. В то же время вибрации среди других внешних факторов, влияющих на погрешность измерения, занимают второе место после температурных.

Настоящая работа была проведена с целью изучения влияния вибраций на рычажно-зубчатые и пружинные приборы для линейных измерений и определения возможности повышения их виброустойчивости путем конструктивных изменений. Были исследованы измерительные рычажно-зубчатые головки типа ИГ (ГОСТ 5.490—70) и многооборотные индикаторы типа МИГ с ценой деления 1 и 2 мкм, широко применяемые в качестве отсчетных устройств различных приборов и измерительных приспособлений. Из



пружинных приборов были исследованы микрометры типа ИГП с ценой деления от 10 мкм до 0,02 мкм; микрометры ИПМ (ГОСТ 14712—69) и оптикаторы типа П (ГОСТ 10593—63). Эти приборы применяются для проверки кинематической точности прецизионных станков и деталей подшипников наивысшей степени точности, а также для поверки концевых мер.

Влияние вибраций на рассматриваемые приборы выражается, главным образом, в изменении показаний из-за колебаний, вздрагиваний, смещений и уменьшения контрастности указателей. Вследствие этого увеличивается погрешность отсчета, повышается утомляемость оператора, снижается производительность труда, а иногда полностью исключается проведение измерений.

Повышение виброустойчивости приборов является одним из самых эффективных способов исключения влияния вибраций на результаты линейных измерений. Виброустойчивость можно характеризовать такой совокупностью режимов вибраций, при которых изменение показаний приборов при их воздействии (по сравнению со статикой) не превышает допустимого значения  $\Delta$ , принимаемого обычно равным 0,1÷0,2 цены деления шкалы.

Головки устанавливались в стойку или какое-либо иное устройство, а затем исследовалось отдельно влияние жесткости закрепления головки и виброустойчивости самой головки на виброустойчивость системы в целом. Наиболее распространенное устройство закрепления головок представляет собой колонку, по которой перемещается кронштейн с головкой (рис. 1). Виброускорение, действующее на прибор, создает силу инерции  $F = m \cdot a$ , где  $m$  — масса головки;  $a$  — виброускорение.

Под действием силы инерции  $F$  колонка-кронштейн деформируется на величину  $\Delta l = \frac{F}{K}$ , что

проявляется в изменении показаний головки (здесь  $K$  — жесткость системы). Деформации изгиба и изменения показаний будут происходить по закону виброускорения и влиять на виброустойчивость всего прибора. Деформация системы зависит от массы головки, амплитуды виброускорения и жесткости системы. При одинаковых жесткости системы и амплитуде виброускорения влияние вибраций на приборы с микрометром (масса 0,37 кг) и оптикатором (масса 1,4 кг) в качестве отсчетного устройства значительно различается. Жесткость системы закрепления головки, как правило, выбирается в зависимости от допустимой деформации, вызываемой колебанием измерительного усилия головки.

Исследования параметров вибраций, действующих на приборы для линейных измерений, показали, что вибрации действуют в равной мере по трем осям координат с частотами от 0 до 60 Гц и виброускорением до 0,6 м/с<sup>2</sup>. Под действием этого виброускорения деформация стойки типа С-1 (ГОСТ 10197—70) при установке в нее оптикатора составляет 0,031 мкм или 1/3 деления оптикатора с ценой деления шкалы 0,1 мкм.

Жесткость стойки С-1 является наивысшей из всех применявшихся систем для закрепления головок. Зачастую головки закрепляют в кронштейнах и стойках, не соответствующих по жесткости не только влиянию вибраций, но даже цене деления головки. Например, при применении оптикатора в стойке горизонтального оптиметра наблюдается низкая виброустойчивость прибора.

Виброустойчивость головок исследовалась по методике [1] на вибраторах с однонаправленными колебаниями. При этом головка закрепляется в приспособлении в рабочем положении, т. е. наконечник измерительного

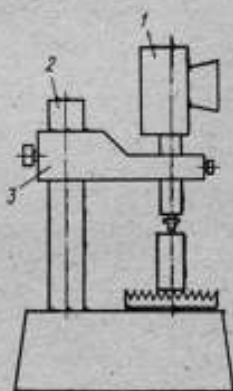


Рис. 1. Устройство для закрепления головок:

1 — головка; 2 — колонка; 3 — кронштейн

штока контактирует с измеряемой поверхностью и вместе с приспособлением крепится на столе вибратора. Головки исследовались под действием вибраций по трем осям разных направлений и при разных положениях указателя по шкале прибора. Пределы измерений параметров вибраций были выбраны несколько шире параметров, зафиксированных в нормативных документах, с целью анализа причин, влияющих на виброустойчивость головок: частоты 5—100 Гц и виброускорения 0—10 м/с.

Исследования проводились на двух электродинамических вибрационных установках: ВЭДС-10а (для головок ИГ, МИГ, ИПМ) и ВЭД-10Б (для микрокатетов и оптикатетов). Особое внимание обращалось на жесткость приспособления для закрепления головок, величину поперечной составляющей вибраций и наличие магнитного поля. Для закрепления головок применялись кронштейны только арочного типа. Обеспечение на вибраторах

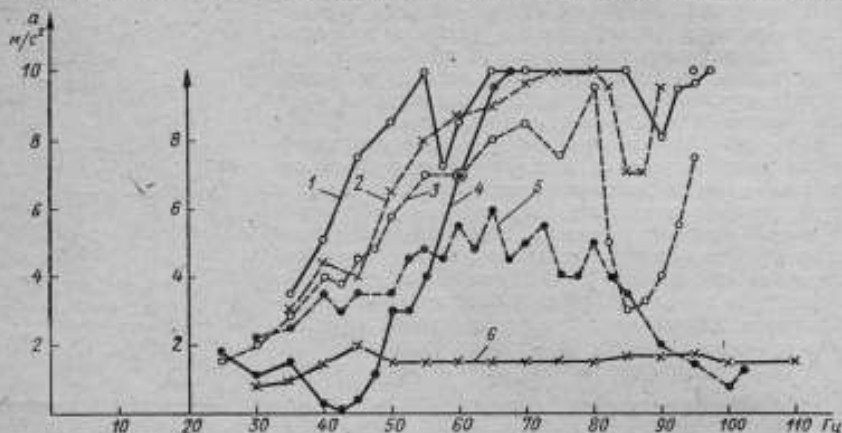


Рис. 2. Виброустойчивость измерительных приборов типов:

1 — ИГ; 2 — МИГ; 3 — ИПМ; 4 — ИПП; 5 — оптикатет

поперечной составляющей, не превышающей 5%, оказалось очень сложным. Так как у приспособления с исследуемой головкой неизвестно точное расположение центра тяжести, то внесосевые нагрузки на платформу могут увеличивать поперечную составляющую вибратора до 200%. В связи с этим перед испытанием каждого типа головок нагрузка на стол центрировалась путем установки дополнительных грузов и изменения положения приспособления на платформе. Допустимая поперечная составляющая вибратора была обеспечена только для вертикального положения оси вибратора, при горизонтальном положении оси вибратора минимальное значение ее было 10—20%.

В связи с невозможностью изменить направление вибрации в пространстве головки поворачивали при вертикальных колебаниях стола для проверки влияния боковых вибраций. Это оказалось возможным благодаря простоте конструкции измерительных механизмов.

Наибольшая виброустойчивость оказалась у рычажно-зубчатых головок ИГ и индикаторов МИГ (рис. 2). Кроме того, эти приборы являются более стойкими к вибрациям, перпендикулярным оси стержня. Виброустойчивость измерительной головки определяется наименьшей величиной ускорения, вызывающего допустимую величину изменения показаний. Малогабаритные пружинные головки ИПМ имеют также сравнительно хорошую виброустойчивость: наименьшее виброускорение составляет 2 м/с<sup>2</sup> при частоте 25—30 Гц. Рис. 2 иллюстрирует виброустойчивость головок под действием вибраций по трем осям координат. Графики начинаются с частот 25—30 Гц,

так как на более низких частотах «размытие» шкалы при больших амплитудах колебаний наступает раньше, чем проявляется влияние вибраций на механизм головки.

Виброустойчивость микрокатеров имеет явно выраженный резонансный характер. Были проверены микрокаторы с ценой делений от 10 до 0,02 мкм. Частоты резонанса колеблются от 40 до 85 Гц. На резонансных частотах виброустойчивость головок определяется очень малым виброускорением — порядка 0,1 м/с<sup>2</sup>, поэтому микрокаторы являются наименее виброустойчивыми из исследуемых приборов.

Были исследованы также микрокаторы шведской фирмы Ногансон с ценой деления от 1 до 0,02 мкм. Они значительно виброустойчивее отечественных головок, резонансные частоты у них наступают при больших частотах, т. е. за пределами рабочего диапазона частот, а наименьшее виброускорение значительно выше.

Исследования показали, что причиной низкой виброустойчивости микрокаторов являются резонансные поперечные колебания стрелки. Изменив конструкцию стрелки, можно сдвинуть резонанс в область высоких частот или увеличить наименьшее критическое виброускорение.

Графики виброустойчивости оптикатора отмечают постоянство виброускорения на всем диапазоне исследуемых частот. Исследования показали, что виброустойчивость оптикатора зависит от дебаланса зеркала, играющего роль компенсатора нелинейности передаточной функции пружинного механизма. В связи с этим даже головки с одинаковой ценой деления шкалы имеют значительно различающуюся виброустойчивость. Изменив конструкцию оптикатора и оговорив в технических требованиях допустимый дебаланс зеркала, можно улучшить виброустойчивость этого прибора.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.717.2

*Г. Я. Гафанович, Б. А. Лихтциндер*

ХВНИИМ

*О. В. Прусихин, Я. М. Цейтлин*

ВНИИМ

### МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Известно, что теоретический и реальный профили поверхностей различны. О степени их сходства можно говорить лишь условно, на базе принятого критерия.

Другими словами, не существует такого взаимного положения теоретической и реальной поверхностей, при котором одна поверхность всеми своими точками совместилась бы с другой.

Полного совмещения двух поверхностей, даже при идеальном их изготовлении, добиться так же трудно, как и выдержать точно их геометрическую форму. Если поверхности реальных объектов рассматривать как случайные реализации, то в этом случае степень приближения одной поверхности к другой можно оценить статистическими методами.

Зная координаты поверхности и совместив базы (рис. 1), можно определить суммарную погрешность формы профили (СПФП), в которую, кроме собственной погрешности отклонения формы, войдет неисключенная часть погрешности базирования

$$\Delta Z(x, y) = Z(x, y) - Z_0(x, y), \quad (1)$$

где  $\Delta Z$  — СПФП;  $Z_0$  и  $Z$  — функции, описывающие соответственно теоретическую и реальную поверхности.

Значение СПФП в данной точке  $K$  выразится как

$$\Delta Z_k = Z(x_k, y_k) - Z_0(x_k, y_k). \quad (2)$$

Максимальным (минимальным) отклонением формы профиля можно назвать наибольшее (наименьшее) значение СПФП на заданном участке  $S$  сравнения:

$$\Delta Z_{\max} = \sup \{ \Delta Z(x, y) \}, \quad (3)$$

$$\Delta Z_{\min} = \inf \{ \Delta Z(x, y) \}. \quad (4)$$

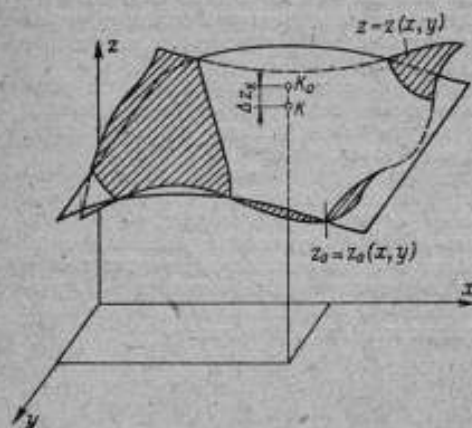


Рис. 1. Совмещение теоретической  $Z_0(x, y)$  и реальной поверхностей.  $\Delta Z$  — погрешность профиля в точке  $K$

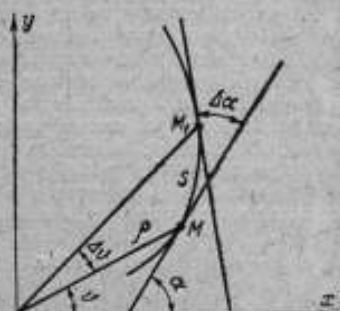


Рис. 2. Определение кривизны профиля  $MM$ ;  $\nu$  — угловая координата,  $\Delta \nu$  — приращение угловой координаты точки  $M$ ,  $\alpha$  — угол касательной в точке  $M$ ,  $\Delta \alpha$  — приращение угла  $\alpha$ ;  $S$  — длина дуги  $MM$ ,  $\rho$  — радиус-вектор точки  $M$

Погрешностью профиля на участке  $S$  сравнения будем называть разность между максимальным и минимальным отклонениями профиля:

$$\Delta Z_S = \Delta Z_{\max} - \Delta Z_{\min}. \quad (5)$$

В качестве статистических характеристик погрешности профиля на заданном участке  $S$  сравнения используют среднее арифметическое значение СПФП на заданном участке, т. е.

$$\bar{\Delta Z}_{(S) \text{ ср}} = \frac{1}{\text{mes} S} \int \int_{(S)} \Delta Z(x, y) dx dy \quad (6)$$

и среднее квадратическое значение СПФП на этом участке, т. е.

$$\Delta Z_{(S) \text{ ср}} = \left[ \frac{1}{\text{mes} S} \int \int_{(S)} \Delta Z^2(x, y) dx dy \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

В случае дискретных измерений отклонений формы поверхности ( $n$  контролируемых точек) выражения (6) и (7) принимают вид

$$\Delta Z_{(S) \text{ сн}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta Z_k, \quad (8)$$

$$\Delta z_{(S) \text{ сн}} = \left[ \frac{\sum_{k=1}^n \Delta Z_k^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

Таким образом, суммарную погрешность профиля можно характеризовать различными величинами или функцией (1). Погрешность базирования зависит от метода совмещения (прилегающая поверхность, срединная поверхность и т. д.) и от чувствительности устройств совмещения.

Форму поверхности можно описать не только функцией ее координат, но также функциями кривизны, естественными математическими уравнениями [8] и т. п. В этих случаях при определенной форме представления таких функций их вид не будет зависеть от выбора осей координат, а также от других преобразований, таких как изменение масштаба, конформные отображения, Фурье-преобразования, различного рода симметричные преобразования и т. д. [1].

Такого рода представление криволинейных поверхностей может оказаться полезной формой описания их конкретных свойств. Более того, можно, по-видимому, создать стандартизированные алгоритмы для получения той или иной функции, описывающей конкретное свойство заданной поверхности, т. е. создать с помощью ЭВМ не только матрицу координат базовой поверхности сравнения, но и матрицы некоторых отдельных ее свойств: кривизны, спектра отклонений от теоретической поверхности и т. п., а также некоторых ее преобразований.

Например, физической величиной, характеризующей форму поверхности и инвариантной по отношению к выбору системы координат, является кривизна. Напомним, что в математике средней кривизной дуги  $S$  кривой (рис. 2) называют отношение угла  $\Delta\alpha$ , составленного касательными, проведенными в концах этой дуги, к ее длине:

$$K_{\text{ср}} = \frac{\Delta\alpha}{S}. \quad (10)$$

Если дуга  $S$  уменьшается до совпадения ее конца в одной точке  $M_1$ , то отношение  $\Delta\alpha/S$  стремится к пределу, который называется кривизной в точке  $M$

$$K_M = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\Delta\alpha}{S} = \lim_{\Delta\nu \rightarrow 0} \frac{\Delta\alpha}{\int \rho d\nu}, \quad (11)$$

где  $\Delta\nu$  — угол между радиусами — векторами  $\rho$ , проведенными из полюса координатной системы к концам рассматриваемой дуги.

Таким образом, кривизну линии в точке можно определить как скорость изменения угла наклона касательной  $\alpha$ , проведенной к кривой в этой точке, при равномерном движении точки вдоль кривой.

Если центр кривизны совпадает с началом координат, то радиус-вектор  $\rho$  точки  $M$  будет равен радиусу кривизны  $R$ , а  $\Delta\alpha = \Delta\nu$ , откуда

$$K = \frac{1}{R}. \quad (12)$$

Кривизна является размерной физической величиной. Ее размерность  $L^{-1}$ ,  $m^{-1}$ .



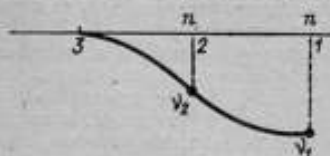
Для плоской линии, заданной уравнением  $Y=f(x)$ , кривизну рассчитывают по формуле [2].

$$K = \frac{Y''}{(1 + Y'^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

Кривизна прямой постоянна и равна нулю, кривизна окружности радиуса  $R$  также постоянна, но равна  $1/R$ .

В отдельных случаях, например для сферических поверхностей, удобнее нормировать не кривизну, а радиус кривизны. Однако для одной из распространенных линий — прямой и плоских поверхностей это приводит к необходимости оперировать с неопределенным значением, так как радиус кривизны плоскости равен бесконечности. В результате из общего ряда выпадает достаточно распространенный случай измерения. При нормировании кривизны такие исключения практически не возникают, так как кривизна равна бесконечности только у идеальной точки.

Рис. 3. Связь кривизны с отклонениями профиля.  $lv_1$  и  $lv_2$  — значения отклонений профиля в точках 1 и 2 для определения кривизны в точке 3



на рис. 3. Изменение кривизны легко выразить через ее дифференциал

$$dK = \frac{[1 + Y'^2] d(Y'') - 3Y''Y' d(Y')}{(1 + Y'^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (14)$$

Значения приращений первой и второй производных  $d(Y')$  и  $d(Y'')$  в точке 3, находящейся на базовой прямой, выражаются через отклонения  $lv_1$  и  $lv_2$  смежных точек следующим образом:

$$dY'_{lv_1} = 0; \quad dY'_{(lv_2)} = \frac{nv_2}{\Delta x};$$

$$dY''_{(lv_1)} = \frac{nv_1}{\Delta x^2}; \quad dY''_{(lv_2)} = \frac{2nv_2}{\Delta x^2}.$$

Отсюда приращение кривизны в точке 3 в общем случае равно

$$dK_3 = \frac{\frac{nv_1}{\Delta x^2}}{(1 + Y'^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{(1 + Y'^2) \left( \frac{-2nv_2}{\Delta x^2} \right) - 3Y''Y' \frac{nv_2}{\Delta x}}{(1 + Y'^2)^{\frac{5}{2}}}.$$

Так как во всех точках базовой прямой производная имеет постоянное значение, равное тангенсу  $p$  угла наклона этой прямой, а вторая производная равна нулю, то окончательно для точки 3 имеем

$$\Delta K_z = \frac{nv_1 - 2nv_2}{\Delta x^2 (1 + \rho^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (15)$$

Таким образом, для контроля непрямолинейности устанавливаются довольно простые соотношения между отклонениями профиля и кривизной. В общем же случае нужно задавать не только направление касательной, но и кривизну базовой линии.

В области метрологических работ часто необходимо физическое воспроизведение базовых поверхностей сравнения, которые теоретически вообще не должны иметь отклонений профиля. В этом случае их представительной числовой или функциональной характеристикой является кривизна. Нужно иметь в виду, что недифференцируемые профили поверхностей также можно характеризовать средними статистическими параметрами кривизны. Использование кривизны позволяет осуществить четкую классификацию теоретиче-

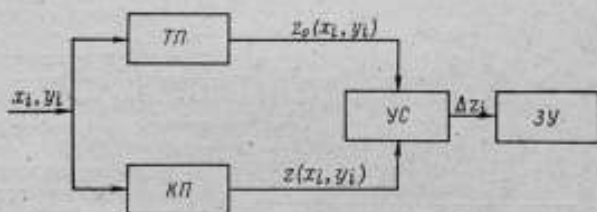


Рис. 4. Структурная блок-схема измерения погрешности профиля

ских поверхностей, разделяя их на поверхности с нулевой, постоянной ненулевой кривизной, а также плоской и пространственной функционально изменяющейся кривизной, вместо используемого в настоящее время качественного деления на простые и сложные формы, что по сути дела произвольно и неопределенно.

Все известные способы измерения отклонений формы поверхностей, а также большинство новых разработок в этой области основаны на сравнении реальных профилей с квазитеретическими плоскими или неплоскими профилями. Причем последние могут быть либо элементами материального тела, либо воспроизведены кинематически, либо образованы фронтом волны когерентного излучения, либо определены математически по набору дискретных точек\* или пучка реализаций профиля. Способы воспроизведения теоретической поверхности и примеры их использования приведены в таблице. Структурная блок-схема измерения погрешности профиля в общем виде представлена на рис. 4. Из схемы видно, что независимо от метода измерения, прибор для сравнения криволинейных поверхностей обычно имеет устройство, воспроизводящее теоретический профиль ТП, устройство сравнения УС теоретического профиля с контролируемым КП и запоминающее устройство ЗУ (например, регистратор), где хранятся все измеренные значения  $\Delta Z$  для последующего отыскания максимума, средней арифметической погрешности, средней квадратической погрешности и т. п. На входы блоков ТП и КП одновременно поступают сигналы, соответствующие координатам  $x_i$  и  $y_i$ , определяющим значение  $\Delta Z$  в текущей точке.

Рассмотрим более подробно способы воспроизведения теоретических поверхностей (см. таблицу) и оценим их с точки зрения применимости для

\* В частности на сферометре сравнивают контролируемую поверхность с поверхностью сравнения, заданной четырьмя точками.

## Примеры воспроизведения плоских и криволинейных поверхностей

Способ воспроизведения поверхности

Форма поверхности	поверхность твердого тела	кинематически	набор дискретных точек	фронт волны излучения
Плоская	Контроль неплоскостности интерференционным методом. Дюнда плоскости по краске Раднусомер	Прямяло П. Л. Чебышева Кругломер	—	Контроль неплоскостности интерференционным методом Измерение отверстий интерференционным методом Контроль теневым методом
Цилиндрическая	Раднусомер	Станок для обработки сферических поверхностей	Сферометры	
Сферическая	Пробное сферическое стекло	Эвольвентомер	Координатно-измерительная машина, управляемая ЭВМ	Голографические методы контроля асферических поверхностей [5]
Криволинейная	Шаблоны, копіры			

получения базовых и образцовых профилей (поверхностей).

1. Воспроизведение теоретической поверхности путем соответствующей обработки твердого тела. Способ широко применяется при воспроизведении плоскостей и криволинейных профилей (шаблонов). Недостатком способа является большая трудоемкость и технологическая сложность. Воспроизведение шаблонов с изменением профилем достигается путем управляемого деформирования твердого упругого элемента, поверхность которого принимает заданную форму\*. В этом случае устраняются затруднения, связанные с параметрической однозначностью реализаций твердого тела.

2. Кинематический способ воспроизведения теоретических профилей. Основная область применения — криволинейные поверхности (эвольвентомеры, приборы для контроля профиля зубьев зацепления М. Л. Ноникова). Его можно использовать также и для воспроизведения плоскостей, например, с помощью так называемого прямил П. Л. Чебышева. Механизм, воспроизводящий ту или иную кривую, можно рассматривать как преобразователь одного вида движения (простейшего) в другой, более сложный (например, преобразователь прямолинейного или вращательного движения в эвольвентную траекторию). Следовательно, такой преобразователь, если он к тому же обладает универсальностью в отношении воспроизведения различных кривых, может быть выполнен как образцовый механизм преобразования линейных (или круговых) траекторий в сложные траектории необходимой формы.

Недостатком является то, что кинематика воспроизводя-

\* Английский патент № 1315283, 1973.

идея реального механизма не совершенна, а для профилей общей формы синтез достаточно точного механизма весьма затруднен [6].

3. Метод дискретного задания геометрической поверхности. Благодаря своей простоте и универсальности метод нашел широкое применение. Успешно используется, например, в сферометрах.

Недостаток метода, ограничивающий его точность, заключается в невозможности материализовать математическую точку, положением которой определяется теоретическая поверхность. В новых приборах на основе данного метода ощупывающий наконечник автоматически перемещается по заданной теоретической траектории от точки к точке, координаты которых хранятся в запоминающем устройстве ЭВМ [9]. Возможно также построение многоточечных (многоконтактных) измерительных устройств.

4. Воспроизведение геометрической поверхности путем формирования формы фронта волны оптического когерентного излучения. Этот метод получает распространение в оптической промышленности при контроле линз и зеркал. Исходный фронт приобретает необходимую форму после прохождения либо через фазовую поверхность (или после отражения от нее), либо через дифракционную решетку, либо через синтезированную голограмму [5].

Формирование волны необходимой формы с помощью линз и криволинейных зеркал, строго говоря, следует отнести к методу воспроизведения теоретической поверхности профилированием твердого тела (в данном случае — линзы или зеркала). Здесь интерференция является чувствительным способом регистрации погрешности профиля. Поэтому в чистом виде способ воспроизведения теоретической поверхности с помощью волнового фронта выступает только в случае дифракции исходного пучка на дифракционной решетке (щели) или синтезированной голограмме. Применение голографических схем позволяет контролировать этим методом как зеркально, так и диффузно отражающие поверхности.

Метод сравнения с базовой (исходной) поверхностью, когда в качестве таковой выступает волновой фронт светового излучения, сформированный с помощью оптической голограммы, синтезированной на ЭВМ, представляется перспективным. На одной ЭВМ при наличии алгоритмов можно синтезировать неограниченное число аналогов поверхностей. Исходными данными для получения голограмм являются теоретические координаты точек на плоскости, передаваемые на графопостроитель, подключенный к ЭВМ. Таким образом обеспечивается прямая связь характеристики криволинейной поверхности с единицей длины, так как восстановление изображения с голограммы осуществляется с помощью излучения с известной длиной волны. На голограмме, помимо базовой исходной поверхности, могут быть синтезированы координатные плоскости, в которых данная поверхность задана. Это позволяет при необходимости упростить установку голограммы и контролируемого объекта относительно друг друга [7]. К недостаткам метода прежде всего относятся ограниченная разрешающая способность фотоматериалов и их недостаточная стабильность.

Точность описанных методов можно проиллюстрировать на примере контроля сфер. Пределы измерения механического сферометра 80—40000 мм, относительная погрешность 0,05—2%. Более точными методами являются оптические, к которым относятся автоколлимационный метод, метод колец Ньютона, бесконтактный интерференционный метод, метод касательных сфер и др. Автоколлимационный метод основан на свойстве сферических поверхностей создавать изображение предмета, помещенного в центр измеряемой поверхности, в том же центре (совпадающее с самим предметом). Этот метод позволяет измерять радиусы кривизны в пределах от 30 до 5000 мм с относительной погрешностью 0,005—0,01%. Метод колец Ньютона основан на явлении интерференции пучков света, отраженных от двух соприкасающихся поверхностей — сферической и плоской. Этот метод пригоден для измерения радиусов кривизны от 5000 мм и выше, относительная погрешность не превышает 0,1%. Бесконтактный интерференционный метод позволяет производить измерения выпуклых и вогнутых сферических поверхностей путем сравнения их с эталонными на образцах поверхностях.

Погрешность этого, а также голографического метода с использованием искусственных голограмм лежит в пределах 0,1—1 мкм и зависит от радиуса кривизны и значения центрального телесного угла, соответствующего контролируемому шаровому сегменту.

Дальнейшее развитие оптического приборостроения связано с ростом требований к точности изготовления и контроля асферических поверхностей — параболюидов, гиперболюидов и др. В настоящее время определение кривизны этих поверхностей производится методами, не позволяющими обеспечить высокую точность и производительность контроля. Так, выпускаемый асферометр ИЗС-7А позволяет измерять отклонение радиуса кривизны поверхности от расчетного с погрешностью порядка  $\pm 1$  мкм.

Нужно отметить, что для довольно обширной группы средств измерений параметров формы поверхностей или отклонений их формы от заданной, основанных на различных методах, еще не разработана система передачи единиц измерения; отсутствуют образцовые средства для поверки кругломеров, приборов контроля прямолинейности и др. Следует подчеркнуть, что необходимо использовать именно эталоны единиц тех или иных физических величин в области измерения криволинейных поверхностей, а не эталоны форм, так как создание последних может привести к бесконечно большому числу специальных эталонов для частных геометрических фигур и нарушить принцип построения поверочных схем.

Из изложенного видно, что кроме специальных эталонов единицы длины, в области криволинейных поверхностей возможно создание специальных эталонов других геометрических свойств поверхности; например, эталона единицы кривизны.

Необходимость создания специального эталона единицы длины (или другой физической величины, например, кривизны) в области измерения криволинейных поверхностей диктуется хотя бы тем обстоятельством, что измерение длины дуги (длины окружности) является трудной технической задачей, так как сопоставить длину криволинейного отрезка с «прямым» метром без деформации меры или объекта невозможно, а преобразование длины дуги в «линейную» длину влечет за собой дополнительные погрешности и само по себе трудно осуществимо. Преобразование длины дуги в угол поворота обкатного ролика известного диаметра задачу не упрощает.

## Выводы

1. В настоящее время отсутствует единая классификация форм поверхностей и нет единой системы метрологического обеспечения контроля отклонений их формы.
2. Разработка и создание отдельных специальных эталонов формы кривых и поверхностей, а также соответствующих отдельных поверочных схем в области контроля непрямолинейности, неплоскостности, некруглости, отклонений эвольвентного профиля и т. д. с метрологической точки зрения неоправданны.
3. Четкая классификация форм поверхностей легко может быть построена с помощью известной характеристики кривизны (кривизна размера, единицей кривизны является  $m^{-1}$ ).
4. Кроме специальных образцовых средств для воспроизведения единицы длины в области контроля параметров криволинейных поверхностей возможно создание специальных эталонов отдельных свойств поверхностей, например, специального эталона единицы кривизны.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин. М., «Мир», 1973, 230 с.
2. Смирнов В. И. Курс высшей математики, т. II, М., «Наука», 1974, 655 с.



3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М., «Наука», 1974, 831 с.

4. Янушкевич Э. П. Измерение отверстий абсолютным интерференционным методом.— «Измерительная техника», 1970, № 10, с. 22—25.

5. Лукин А. В., Мустафин К. С. Контроль профиля асферических поверхностей с помощью одномерных искусственных голограмм.— «Оптико-механическая промышленность», 1973, № 6, с. 67—68.

6. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин, изд. 2-е, М., Гостехиздат, 1952, 712 с.

7. Ларионов Н. П., Лукин А. В., Мустафин К. С. Голографический контроль формы неполированных поверхностей.— «Оптико-механическая промышленность», 1972, № 3, с. 35—37.

8. Геронимус Я. Л. Геометрический аппарат теории синтеза плоских механизмов, М., Физматгиз, 1962, 399 с.

9. Симак И., Земан Т. О характеристиках отклонений форм реальных поверхностей.— «Метрология», 1975, № 6, с. 3—9.

Поступила в редакцию 21/IX 1975 г.

УДК 531.717.82

В. В. Леонов

Свердловский филиал ВНИИМ

### О ШАГОВОМ МЕТОДЕ ИЗМЕРЕНИЯ НЕПРЯМОЛИНЕЙНОСТИ

Одним из наиболее распространенных методов измерения непрямолинейности является шаговый. Известно, что при таком методе длина проверяемой поверхности разбивается на равные отрезки и последовательно (шаг за шагом) измеряется разность высот концов отрезков. После простой, но довольно трудоемкой математической обработки результатов измерений определяется профиль поверхности. Число отрезков  $N$  выбирается в значительной степени произвольно. В связи с этим при выборе слишком малого числа  $N$  сокращается объем информации о профиле поверхности. Чрезмерное увеличение приводит к возрастанию числа измерений и не дает новой информации о профиле.

Таким образом, необходимо выбрать такое число  $N$ , которое позволило бы сохранить всю необходимую информацию о профиле поверхности и одновременно минимизировать объем работ.

Обозначим через  $y(x)$  функцию, описывающую профиль поверхности длиной  $L$ . Первоначально  $y(x)$  определим в промежутке  $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ , где расположена измеряемая поверхность, а затем периодически продолжим на всю ось  $x$ . Потребуем выполнения условий

$$y\left(-\frac{L}{2}\right) = y\left(\frac{L}{2}\right), \quad y^{(1)}\left(-\frac{L}{2}\right) = y^{(1)}\left(\frac{L}{2}\right), \quad \dots \\ \dots, \quad y^{(k)}\left(-\frac{L}{2}\right) = y^{(k)}\left(\frac{L}{2}\right). \quad (1)$$

считая производные односторонними. В дальнейшем именно периодически продолженную функцию  $y(x)$  будем называть профилем поверхности.

Представим  $y(x)$  тригонометрическим рядом Фурье

$$y(x) = S_n(x) + R_n(x), \quad (2)$$

где  $S_n(x)$  — частичная сумма ряда Фурье функции  $y(x)$ .

$$S_n(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^n \left( a_m \cos \frac{2\pi}{L} mx + b_m \sin \frac{2\pi}{L} mx \right), \quad (3)$$

а  $R_n(x)$  — остаток ряда

$$R_n(x) = \sum_{m=n+1}^{\infty} \left( a_m \cos \frac{2\pi}{L} mx + b_m \sin \frac{2\pi}{L} mx \right), \quad (4)$$

$$a_m = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y(x) \cos \frac{2\pi}{L} mx dx, \quad b_m = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y(x) \sin \frac{2\pi}{L} mx dx. \quad (5)$$

Отбросим второй член в правой части формулы (2) и ограничимся приближенным представлением  $y(x)$  частичной суммой ее ряда Фурье. Погрешность  $\delta_n(x)$  такого приближения определим как

$$\delta_n(x) = \frac{|R_n(x)|}{\max |y(x)|}. \quad (6)$$

При известной величине  $\delta_n(x)$  соотношение (6) можем рассматривать как уравнение для  $n$ , определяя последнее так, чтобы  $\delta_n(x)$  не превышала некоторой заданной величины  $\delta$ , т. е.  $\max \delta_n(x) \leq \delta$ . Найденное таким путем  $n$  позволяет установить число членов в частичной сумме (3), с заданной точностью приближающей функцию  $y(x)$ .

Частичная сумма  $S_n(x)$  содержит слагаемые вплоть до члена с номером  $n$ . Для каждой гармоники имеем две составляющие  $a_m$  и  $b_m$ , а всего

$$N = 2n + 1. \quad (7)$$

составляющих, включая и постоянную  $a_0$ . Следовательно, для определения всех коэффициентов частичной суммы  $S_n(x)$  достаточно знать значения функции  $y(x)$  в  $N$  точках промежутка  $\left[ -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \right]$ .

Таким образом, формулы (6) и (7) дают возможность выбрать наименьшее число  $N$  отрезков, на которое следует разбить длину измеряемой поверхности, чтобы восстановить функцию  $y(x)$  с заданной точностью.

Для решения задачи наложим на функцию поверхности следующее ограничение: изменение  $y(x)$  и ее  $k$ -й производной  $y^{(k)}(x)$  в промежутке  $\left[ -\frac{L}{2}, \frac{L}{2} \right]$  должно быть ограниченным. Оценим остаток  $R_n(x)$  ряда Фурье функции  $y(x)$ .

Обозначим через  $a^{(k)}_m$ ,  $b^{(k)}_m$  коэффициенты ряда Фурье функции  $y^{(k)}(x)$ . Представим  $a^{(k)}_m$  в виде

$$a^{(k)}_m = \frac{2}{L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} y^{(k)}(x) d \left( \frac{L}{2\pi m} \sin \frac{2\pi}{L} mx \right) = \frac{1}{\pi m} y^{(k)}(x) \sin \frac{2\pi}{L} mx \Big|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} - \frac{1}{\pi m} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin \frac{2\pi}{L} mx dy^{(k)}(x). \quad (8)$$

Оценивая последний интеграл, находим

$$\left| \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \sin \frac{2\pi}{L} mx dy^{(k)}(x) \right| \leq \frac{V}{2} y^{(k)}(x). \quad (9)$$

Тогда из (8) и (9) имеем

$$|a_m^{(k)}| \leq \frac{1}{\pi m} \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y^{(k)}(x). \quad (10)$$

где  $\frac{L}{2} y^{(k)}(x)$  — полное изменение  $y^{(k)}(x)$  в промежутке  $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ .

Воспользовавшись известными соотношениями\* между коэффициентами Фурье функции и ее производных, получаем

$$|a_m| \leq \frac{1}{\pi m^{k+1}} \left(\frac{L}{2\pi}\right)^k \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y^{(k)}(x). \quad (11)$$

Так же оценивается коэффициент  $b_m$ . С помощью (11) и (4) получаем окончательно оценку

$$\begin{aligned} |R_n(x)| &\leq \sum_{m=n+1}^{\infty} (|a_m| + |b_m|) \leq \frac{2}{\pi} \left(\frac{L}{2\pi}\right)^k \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y^{(k)}(x) \times \\ &\times \sum_{m=n+1}^{\infty} \frac{1}{m^{k+1}} \leq \frac{2}{\pi k n^k} \left(\frac{L}{2\pi}\right)^k \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y^{(k)}(x). \end{aligned} \quad (12)$$

Подставляя теперь (12) в (6), заменяя  $\delta_n(x)$  на  $\delta$  и учитывая, что

$$\max |y(x)| \leq \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y(x), \quad (13)$$

найдем

$$\delta > \frac{2}{\pi k n^k} \left(\frac{L}{2\pi}\right)^k \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y^{(k)}(x) \frac{\frac{L}{2}}{\frac{L}{2}} y(x). \quad (14)$$

Полученное соотношение дает возможность определить с помощью (7) иско-  
мое число  $N$ .

\* Харди Г. Х., Рогозянский В. В. Ряды Фурье М., Физматгиз, 1962.

На функции, описывающие профили поверхностей  $n$ , по крайней мере, их первую и вторую производные, можно наложить дополнительные ограничения, исходя из простых геометрических свойств этих функций. Прежде всего, профили поверхностей описываются чрезвычайно медленно меняющимися функциями, и всегда можно принять  $y^{(1)}(x) \ll 1$ . Это позволяет вторую производную связать с радиусом кривизны  $\rho(x)$ , т. е.

$$y^{(2)}(x) \approx \frac{1}{\rho(x)}. \quad (15)$$

Обозначим через  $\beta L$  наибольшую длину участка поверхности, на котором функция  $y(x)$  может быть аппроксимирована дугой окружности радиуса, равного  $\min|\rho(x)|$ , с относительной погрешностью, не превышающей  $\delta$ . Если теперь через  $\Delta(\beta L)$  обозначить наибольшее отклонение профиля поверхности от прямолинейности на отрезке  $\beta L$ , то не трудно получить

$$\min|\rho(x)| \approx \frac{1}{\max|y^{(2)}(x)|} \approx \frac{1}{2\Delta(\beta L)} \left(\frac{\beta L}{2}\right)^2. \quad (16)$$

Значения функции  $y(x)$  и  $y^2(x)$ , заданные в промежутке  $\left[-\frac{L}{2}, \frac{L}{2}\right]$ , позволяют разбить его на конечное число частей (для каждой функции), в каждой из которых  $y(x)$  и  $y^2(x)$  монотонны. При этом в большинстве практических случаев число областей монотонности  $y(x)$  и  $y^2(x)$  на длине измеряемой поверхности совпадает. Тогда, полагая в (14)  $k=2$ , заменяя отношение полных вариаций функций  $y(x)$  и  $y^2(x)$  отношением максимальных значений их модулей, и учитывая соотношение (16), а также что

$$\Delta L \sim \sqrt{L}, \quad (17)$$

найдем

$$\delta \approx \frac{1}{16n^2\beta^{3/2}} \quad (18)$$

и

$$n \approx \frac{1}{4\sqrt{\delta}\beta^{3/2}}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (7), находим наименьшее число отрезков  $N$ , на которое следует разбить длину измеряемой поверхности, чтобы восстановить  $y(x)$  с необходимой точностью.

Анализ большого экспериментального материала, накопленного в лаборатории линейно-угловых измерений Свердловского филиала ВНИИМ, показывает, что всегда  $\frac{1}{6} \leq \beta \leq 1$ . Таким образом, из (19) имеем

$$\frac{1}{\sqrt{\delta}} > n > \frac{1}{4\sqrt{\delta}}. \quad (20)$$

Оставляя в (20) верхнюю оценку для  $n$ , с помощью (7) находим практически удобную верхнюю оценку для  $N$

$$N \approx \frac{2}{\sqrt{\delta}} + 1. \quad (21)$$

Например, при измерении профиля поверхности с помощью уровня относительная погрешность  $\delta$  отношение абсолютной погрешности профиля к максимальному отклонению профиля проверяемой поверхности от прямолинейности будет порядка 0,1. Используя формулу (21), для получения полной инфор-

мации о профиле поверхности с помощью уровня ее длину достаточно разбить на  $N=7$  частей, т. е. измерить профиль в семи точках.

Предлагаемую методику расчета можно применять и для определения неплоскостности поверочных и разметочных плит, тем более, что с увеличением размеров этих поверхностей число измерений и вычислений резко возрастает.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

УДК 531.717.5.088

М. Г. Богуславский, Р. А. Лаанеотс

ЭНИИМ

### ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЕРКИ ТОЛЩИНОМЕРОВ ПЛЕНОК (ПОКРЫТИЙ)

Металлические, полупроводниковые и диэлектрические пленки применяются в микроэлектронике, высокочастотной аппаратуре, полупроводниковой технике, интерференционной микроскопии, ядерной физике и ракетной технике.

Широкое применение в оптике, электронике и ракетной технике получили отражающие и просветляющие пленки, расщепители лучей, узко- и микрополосные интерференционные фильтры, поляризаторы, радиационные детекторы, пленки электрооптических преобразователей, усилителей света и преобразователей солнечной энергии, поверхностные пленки для регулирования температуры спутников, пассивные и активные элементы для пленочной электроники, тонкопленочные схемы и сверхпроводящие пленочные устройства, пленки защитные и др. Такие широкие возможности применения пленок вызывают особый интерес инженерно-технических работников к физическим свойствам, технологии изготовления и измерения их параметров.

Толщина пленок является важнейшим параметром, входящим почти во все теоретические соотношения, описывающие свойства пленок. Для измерения толщины пленок в последнее время создано множество приборов, основанных на различных принципах действия, поэтому вопросы обеспечения единства измерений в этой области приобретают исключительно важное значение.

Большое значение вопросы поверки приборов для измерения толщины пленок приобретают также в связи с применением и внедрением в производство и при научных исследованиях новых толщиномеров пленок, принцип действия и характеристики которых весьма различны и зависят от многообразия различных комбинаций материалов и их свойств. Каждый из принципов определения толщины пленки предполагает знание по меньшей мере одной из констант, характеризующих вещество пленки и подложки: плотности, показателя преломления, удельного сопротивления, атомного номера и т. д. Это означает, что большинство толщиномеров измеряют не толщину, а какое-то свойство материала пленки или подложки, связанное с толщиной известным физическим уравнением. Так, Беридт [1] измерял толщину пленки по электрическому сопротивлению пленки; Эхардт [2] определял толщину магнитной пленки по частоте колебаний пленки в магнитном поле; с помощью толщиномеров ИТП-1 измеряют силу притяжения магнита, функционально связанного с толщиной пленки, а толщиномером БТП-3 измеряют интенсивность рассеяния  $\beta$ -лучей и т. д. Не существует универсального неразрушающего метода измерения, который мог бы одинаково применяться для всех материалов и не зависеть от электропроводности, магнитной проницаемости, атомного номера и других параметров материала, за исключением измерения толщины пленки прямым измерением длин до и после процесса покрытия.

Большой ущерб народному хозяйству наносится большими погрешностями измерения толщины пленок при проведении исследований. Эти погреш-



ности входят во все соотношения, характеризующие свойства пленок. В интересах производства необходимо, чтобы все измерения толщины пленок приводились к государственному эталону длины—метра. Это обеспечит единообразие результатов измерений одной и той же толщины пленки, производимых в разных местах и приборами, основанными на различных принципах действия.

В последнее время во ВНИИМ проведены исследования по разработке методов и средств поверки толщиномеров с целью обеспечения единства измерений в области измерения толщины пленок. Разработаны конструкция и технология изготовления образцовых мер толщины, а также технические требования к этим мерам. Разработаны и изготовлены макеты образцовых средств для их аттестации. Проведены исследования влияния различных факторов при аттестации мер толщины.

### Образцовые меры толщины пленок

Образцовые меры толщины пленок предназначены для поверки толщиномеров пленок. Основным параметром их является толщина пленки, так как с ней сравниваются показания толщиномеров пленок. Уравнение измерения толщиномером может быть представлено:

$$y = f(h_0), \quad (1)$$

где  $y$  — показание толщиномеров пленок;  $h_0$  — действительное значение толщины пленки образцовой меры.

Толщина пленки может быть выражена расстоянием между поверхностями пленки и подложки —  $h_{ср.}(h_1)$  или усредненным значением расстояний между поверхностями пленки и подложки по нормали к средней плоскости поверхности подложки —  $h_{ср}$  [3 и 4].

Образцовые меры толщины пленок представляют собой пластину — подложку с нанесенной на нее пленкой. Пленка наносится так, чтобы она занимала часть поверхности подложки, а способ нанесения пленки на подложку должен быть таким

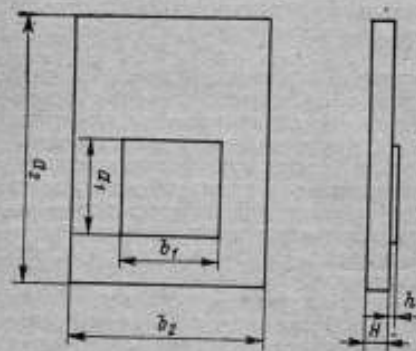


Рис. 1. Образцовые меры толщины пленок

же, как и способ нанесения пленки на деталь (гальванический, химический, диффузионный и т. д.). Меры толщины пленок, скомплектованные в наборы, были изготовлены на заводе «Эталон». Пленка наносилась на подложку гальваническим способом. Размеры этих мер следующие:  $a_1 = b_1 = 20$  мм;  $a_2 = 60$  мм;  $b_2 = 40$  мм;  $H = 10$  мм (рис. 1).

Для измерения толщины пленки образцовых мер в данной точке применялся разработанный авторами макет поверочной установки. Установка позволяет производить измерение толщины пленки контактным способом в любой точке поверхности подложки.

Для определения неравномерности толщины пленки, нанесенной гальваническим способом на подложку (размеры  $20 \times 20$  мм), измерялась в двадцати произвольных точках толщина пленки у 100 мер, покрытых пленкой золота, серебра, кадмия, цинка, меди и т. д. Результаты исследований неравномерности толщины пленки приведены на рис. 2. Обработка этих результатов по способу наименьших квадратов с помощью электронно-вычислительной машины М20 показала, что неравномерность толщины пленки зависит от средней толщины пленки и может быть выражена зависимостью

$$\varepsilon_1 = 0,11\bar{x} + 0,07; \quad r_1 = 0,89, \quad (2)$$

где  $e_i$  — неравномерность пленки по толщине, полученная по результатам измерения толщины пленки в точках;  $\bar{x}$  — среднее арифметическое результатов измерений толщины пленки в 20 точках;  $r$  — коэффициент корреляции.

Коэффициент корреляции  $r=0,89$  показывает, что связь между неравномерностью пленки по толщине и средним арифметическим результатом достаточно тесна.

Если неравномерность пленки по толщине превышает заданные значения, то необходимо уменьшить площадь образцовой меры, на которой производится аттестация, до такого значения, при котором неравномерность пленки по толщине не будет превышать заданного значения. В аттестате на образцовую меру указывается размер площади, при которой неравномерность по толщине не превышает заданных значений.

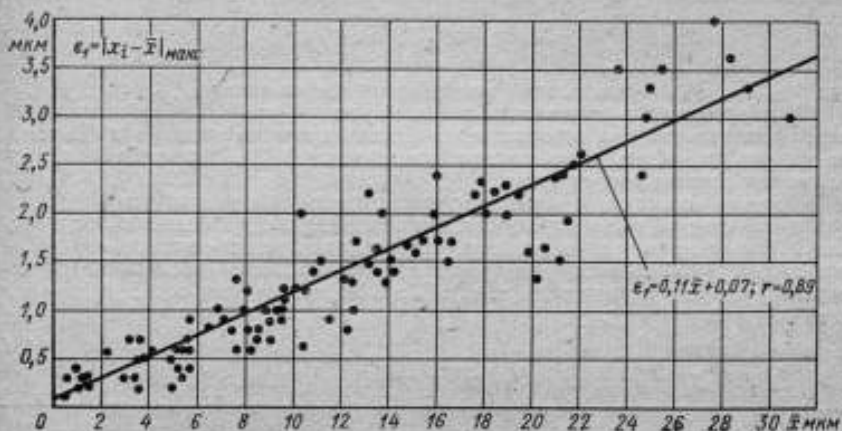


Рис. 2. Зависимость между неравномерностью толщины пленки и средней ее толщиной

Из 100 мер, которые были аттестованы во ВНИИМ на площади  $20 \times 20$  мм — 31 мера имели неравномерность толщины пленок, превышающую заданные значения. При повторной аттестации этих мер оказалось, что неравномерность по толщине не превышает заданные значения на площади  $8 \times 8$  мм.

### Толщиномеры пленок

Для измерения толщины пленок применяются специальные приборы — толщиномеры пленок, принципы действия и характеристики которых весьма различны. На большинстве из них измеряют толщину пленки, исходя из свойств материалов пленки и подложки, связанных с толщиной пленки известной зависимостью вида

$$y = f(h_0, V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_n), \quad (3)$$

где  $y$  — показание толщиномера пленок;  $h_0$  — действительное значение измеряемой толщины пленки;  $V_j$  —  $j$ -я влияющая величина;  $n$  — число влияющих величин.

Влияющие величины обычно не имеют конкретного точного значения, а изменяются в каких-то пределах. Поэтому разброс показаний толщиномера

в зависимости от изменений значений влияющих величин можно определить по формуле

$$\delta_y = \left[ \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial V_j} \right)^2 \delta V_j^2 k_j^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

где  $\delta_y$  — разброс показаний толщиномеров пленок;  $\delta V_j$  — разброс  $j$ -й влияющей величины;  $k_j$  — коэффициент относительного рассеивания  $j$ -й влияющей величины.

Проверка толщиномеров пленок должна производиться в нормальных условиях. При этом показания толщиномеров являются функцией от значения толщины пленки образцовой меры и нормальных значений влияющих величин:

$$y = f(h_0, V_{1H}, \dots, V_{nH}), \quad (5)$$

где  $V_{1H}, \dots, V_{nH}$  — нормальные значения влияющих величин.

Для определения нормальных значений или нормальной области значений влияющих величин, при которых значение основной погрешности толщиномеров не должно превышать установленных пределов, во ВНИИМ разработаны и изготовлены специальные средства.

Плоские подложки и листы из фольги, ленты или пленки без подложки различной средней толщины служат для определения нормальной области значений большинства влияющих величин (например, расстояния от оси измерительного преобразователя до края подложки, магнитной проницаемости материала пленки подложки и т. д.). Характеристики подложек приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики плоских подложек (60×40×10 мм)

№ подложки	Материал подложки	Твердость подложки	Шероховатость верхней поверхности подложки $R_a$ , мкм (ГОСТ 2780-73)
1	Сталь 45, ГОСТ 1050-60	Незакаленная	0,10-0,16
2	» 10, » 1050-60		
3	» 85, » 1050-60		
4	» 45, » 1050-60		
5	» » » »		
6	» » » »		
7	» » » »		
8	» » » »		
9	» » » »		
10	» » » »		
11	Сталь X, ГОСТ 5950-51	HRC 10	0,10-0,16
12	Алюминиевый сплав АМг 5, ГОСТ 4784-65	HRC 25	
		HRC 43	
		HRC 64	
13	То же	Незакаленная	8-10
14	»	»	1,25-2,5
15	»	»	0,40-0,63
16	»	»	0,10-0,16
17	Латунь ЛС 59-1 ГОСТ 1019-47	»	0,025-0,040
18	То же	»	—
19	»	»	—
20	»	»	—
21	»	»	—

Исследования влияния радиуса кривизны поверхности подложки на показания толщиномера проводились с помощью подложек в виде полуцилиндров, у которых наружная поверхность применялась для исследования влияния радиуса выпуклости подложки, а внутренняя поверхность для исследования влияния радиуса вогнутости поверхности подложки на показания толщиномера. В качестве пленки при этом служили листы из фольги или ленты (см. табл. 2). Размеры ступеней полуцилиндровых подложек приведены в табл. 3.

Исследование влияния толщины подложки на показания толщиномера производилось по специальным подложкам, вырезанным из фольги или ленты разной средней толщины.

Шестигранная ступенчатая подложка (рис. 3) использовалась для определения нормальных значений высоты ступеньки (шесть ступенек  $H_c = 2, 4, 8, 12$ ,

Таблица 2

Характеристики фольги, ленты и пленки (60×40 мм)

№ отп-кта	Подложка	Материал подложки	Средняя толщина подложки, мкм
1	Фольга алюминиевая рулонная для технических целей, ГОСТ 618—62 Лента из алюминия, ГОСТ 13726—68	Алюминий марок: АД-1 и АД, ГОСТ 4784—65, А7, А6 и А5, ГОСТ 11069—64	5, 9, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100, 120, 150, 180, 200 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500
2	Фольга медная рулонная для технических целей, ГОСТ 5658—51 Лента медная общего назначения, ГОСТ 1173—49	Медь марок: М1 и М2, ГОСТ 859—66	15, 20, 30, 40, 50 60, 70, 80, 100, 120, 150, 180, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1500
3	Фольга листовая оловянная, ГОСТ 1327—47	Олово 0,2, ГОСТ 860—60, с присадкой Су <sub>2</sub> , ГОСТ 1089—62	15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
4	Пленка из фторопласта-4 конденсаторная, ГОСТ 10536—63 Бумага для электролитических конденсаторов, ГОСТ 12785—67	Фторопласт-4 —	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 10, 13, 27, 35, 55, 75, 95
5	Лист из технического прозрачного целлулона, ГОСТ 576—41	—	150, 200, 300, 400, 500, 800, 1000, 1500, 2000
6	Микалента, ГОСТ 4268—65	—	80, 100, 130, 170

18 и 24 мм) и расстояния от оси измерительного преобразователя до края ступеньки. При этом в качестве пленки применялись те же листы, которые использовались для определения других влияющих величин.

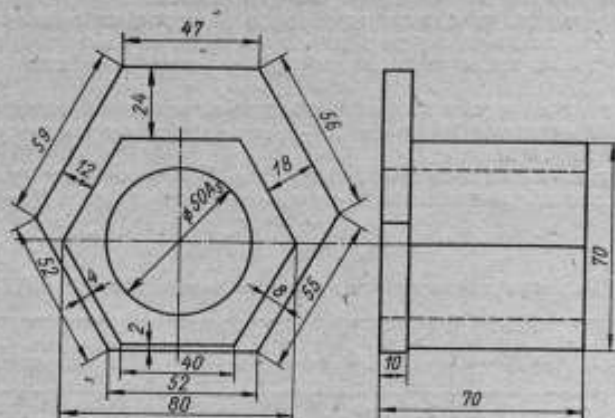


Рис. 3. Схема шестигранной ступенчатой подложки

Все исследования толщиномеров с измерительным преобразователем проводились на устройстве, позволяющем исследовать все влияющие величины, приведенные в табл. 4. Для определения нормальных значений влияющей

Таблица 3

Характеристики ступенчатых подложек-получилиндров

Материал подложки	Шероховатость поверхностей подложки $R_a$ , мкм (ГОСТ 2789-73)	Радиус выжло-ств., мм	Радиус выгнуто-ств., мм
Сталь 45, ГОСТ 1050-60 Алюминиевый сплав АМг5, ГОСТ 4784-65	0,40-0,63	98	90
		80	70
		60	50
		50	40
		40	30
Сталь 45, ГОСТ 1050-60 Алюминиевый сплав АМг5, ГОСТ 4784-65	0,40-0,63	25	15
		20	10
		15	5
		8	3
		5	—

величины остальные величины выдерживаются постоянными или в пределах нормальных значений, а исследуемую величину изменяют в пределах ее действительных значений. Необходимые средства для исследования толщиномеров приведены в табл. 4.



## Средства для определения нормальных значений влияющих величин

Средства для определения нормальных значений влияющих величин	Влияющая величина
Специальные устройства для исследования толщиномеров пленок. Листы из фольги, ленты или пленки без подложки разной средней толщины. Плоские подложки	Расстояние от оси измерительного преобразователя до края пленки (подложки) $L$ ; химический состав материала пленки, подложки; твердость материала пленки, подложки; шероховатость верхней поверхности пленки, подложки $R_z$ ( $R_a$ ); наклон измерительного преобразователя $\varphi$ ; прочие влияющие величины $\sum_{j=1}^m V_j$
Подложки-полуцилиндры	Радиус выпуклости верхней поверхности подложки $R_R$ ; радиус вогнутости верхней поверхности подложки $R_B$
Подложки из фольги или ленты. Ступенчатая шестигранная подложка	Толщина подложки $H$ ; высота ступеньки $H_c$ ; расстояние от оси измерительного преобразователя до края ступеньки $L_c$
Средства для определения измерительного усилия (набор гирь Г-2-610, ГОСТ 7328—61, вместе с приспособлением НУ ГОСТ 8290—57, пружинный динамометр и др.)	Измерительные усилия $P$
Термометры типа ТЛ-18, ТЛ-19 или ТЛ-4 № 2, ТЛ-5 № 1 для поверочных лабораторий. Секундомер, ГОСТ 5072—67	Температура пленки, подложки и окружающей среды $T$ ; продолжительность измерения, продолжительность работы толщиномера в непрерывном режиме $t$
Магазины емкости (ГОСТ 6746—65), магазины индуктивности (ГОСТ 10770—64), мосты переменного тока и др.	Магнитная проницаемость материала пленки, подложки $\mu$
Катушки электрического сопротивления (ГОСТ 6864—69), магазины сопротивления (ГОСТ 7003—64), мосты постоянного тока (ГОСТ 7165—66), омметры, ГОСТ 8038—60 и др.	Электропроводность материала пленки, подложки $\sigma$

Средства для определения нормальных значений влияющих величин	Влияющая величина
Резистивные, емкостные, индуктивные мосты для измерения емкости нулевым методом и др.	Диэлектрическая константа материала пленки, подложки $\epsilon$
Весы лабораторные (ГОСТ 15076—69), микрометр (ГОСТ 11195—65), штангенциркуль (ГОСТ 166—63) и др.	Плотность материала пленки, подложки $\rho$

## Токовихревые толщиномеры

Токовихревые толщиномеры — самая большая группа из всех толщиномеров. Вывод формул, связывающих показания толщиномеров с действительной толщиной пленки и с влияющими величинами, практически не осуществим.

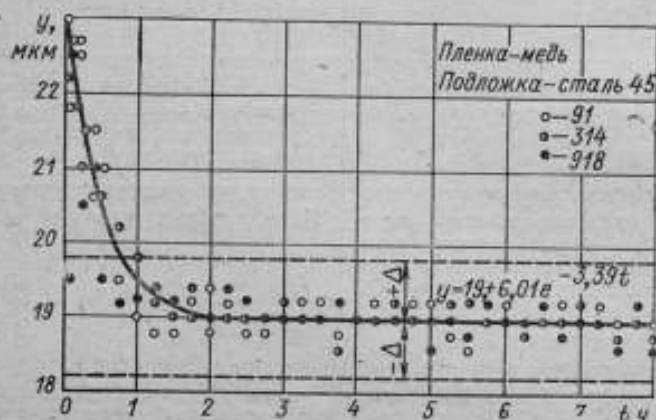


Рис. 4. Изменение показаний толщиномеров пленок КТП-1А во времени при измерении усредненной толщины пленки 19 мкм на поверхности подложки с площадью  $12 \text{ мм}^2$

Поэтому можно воспользоваться только зависимостью вида

$$y = f \left( h_0, \mu_1, \mu_2, \sigma_1, \sigma_2, R_{21}, R_{22}, \varphi, R_2, L, H, t, P, \sum_{j=1}^n V_j \right), \quad (6)$$

где индексом 1 и 2 обозначают соответственно пленку и подложку;  $n$  — число прочих влияющих величин.

Из зависимости (6) следует, что при измерениях толщин пленок для данного типа толщиномеров большую роль играют магнитная проницаемость и электропроводность материалов пленки и подложки.

Результаты исследования токовых ренгенов толщиномеров типа КТП-1А № 91, 314 и 918, выпускаемых московским опытным заводом «Контрольприбор», приведены на рис. 4—12. Результаты исследования остальных толщиномеров пленок приведены в табл. 5.

Таблица 5

Пределы нормальных значений влияющих величин

Тип толщиномеров пленок	Твердость материала подложки, HRC	$R_{220}^*$ , мм	$L_{II}^*$ , мм	$H_{III}^*$ , мм	$R_{220}^*$ , мм	$R_{220}^*$ , мм	$\Psi_{II}^*$	$L_{ср}^*$ , мм	$t_{II}^*$ , мм
MTA-2	30	6,3	0	0,65	10	90	1	5	—
MT1 634	—	—	0	0,50	20	15	40	—	—
MT1 635	—	—	0	0,20	6	14	25	—	—
Smaltometer	—	—	0	0,30	10	90	1	10	—
Layer — Test LT 010	—	—	5	0,90	70	90	5	30	—
Magnus Junior	—	—	7	0,90	65	70	10	20	—
MSM I	—	5,0	9	1,00	75	75	5	25	—
MSM II	—	6,3	15	1,00	70	70	10	41	—
MSM III	—	10,0	8	1,10	50	65	15	45	—
MSM IV	—	20,0	11	0,90	80	70	15	50	—
MSM V	—	100,0	20	0,60	100	100	20	57	—
Elcometer I	—	—	15	0,80	70	70	10	41	—
Elcometer II	—	—	17	0,80	80	80	10	44	—
Elcometer III	—	—	20	0,80	100	100	10	57	—
TC-1	40	3,2	17	1,10	55	90	2	15	12
Monimeter 2.094	—	—	2	1,00	40	40	10	17	10
Ultrameter A8	—	—	5	1,20	70	70	1	15	120
Ultrameter A8-S	—	—	8	1,80	45	85	1	15	100
Leptos kop SMG 8	—	—	8	0,90	80	80	10	19	60
КТП-1А	15	3,2	4	0,50	20	40	2	8	50
ТПН-1	—	3,2	13	0,25	70	80	1	22	60
Minitor	—	—	8	0,45	90	85	1	23	60
Leptometer NET200	—	—	9	0,80	90	120	1	16	30
Isotron A1	—	—	8	0,25	120	120	1	15	5
Бетамикрометр	—	3,2	2	0,80	—	—	—	—	20
БМП-1	—	3,2	3	1,00	—	—	—	—	20

Из результатов исследований (см. рис. 10-12) видно, что показания толщиномеров пленок типа КТП-1А при большинстве влияющих величин изменяются по экспоненте вида

$$y = h_{ср} + ae^{kV_j} \quad (7)$$

где  $h_{ср}$  — средняя толщина используемой при исследованиях пленки;  $a$  — коэффициент экспериментальной кривой, характеризующий максимальное влияние величины  $V_j$  на показания толщиномеров;  $k$  — коэффициент, определяющий вид и характер экспериментальной кривой;  $V_j$  — значение  $j$ -й влияющей величины. Нормальные значения влияющих при известной экспоненте вида (7) находим по критерию:

$$ae^{kV_j} \leq 0,3\Delta \quad (8)$$

где  $\Delta$  — предел допускаемой основной погрешности толщиномеров пленок, откуда

$$V_{jH} = \frac{\ln 0,3 + \ln \Delta - \ln a}{k} \quad (9)$$

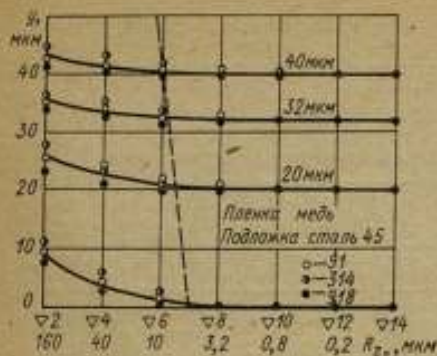


Рис. 5. Влияние шероховатости верхней поверхности подложки на показания толщиномеров КПИ-1А

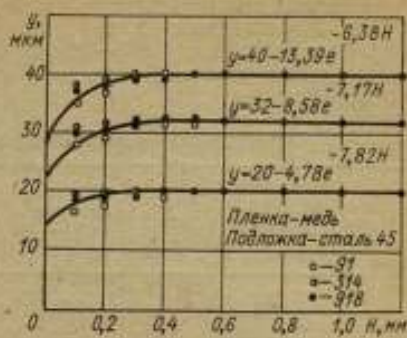


Рис. 6. Влияние толщины подложки на показания толщиномеров КПИ-1А

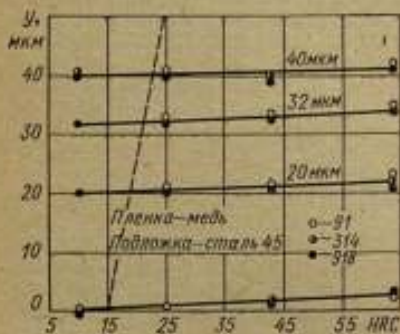


Рис. 7. Влияние твердости подложки на показания толщиномеров КПИ-1А

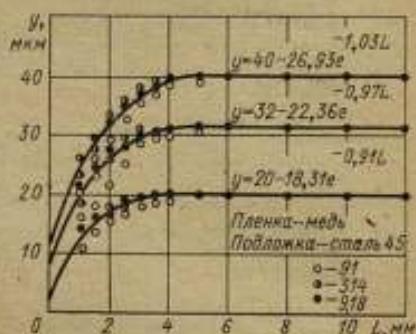


Рис. 8. Влияние расстояния от края подложки до оси измерительного преобразователя на показания толщиномеров КПИ-1А

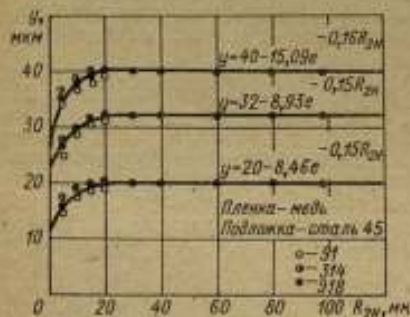


Рис. 9. Влияние радиуса выуклости подложки на показания толщиномеров КПИ-1А

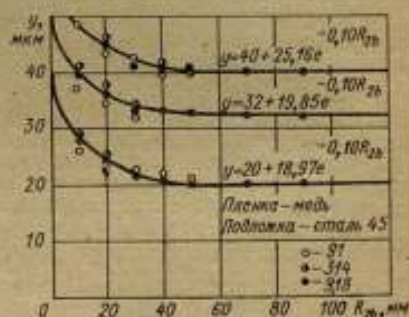


Рис. 10. Влияние радиуса вогнутости подложки на показания толщиномеров КПИ-1А



Для определения коэффициентов  $a$  и  $k$  экспоненциальной зависимости (7) была составлена программа для электронно-вычислительной машины «Проминь». Полученные результаты значений  $a$  и  $k$  приведены на графиках (см. рис. 10, 11, 12). Определение нормальных значений влияющих величин по  $a$  и  $k$  производилось по формуле (9). Например, по экспериментальной кривой  $y = 19 + 6,01 e^{-3,29x}$  (рис. 10), используя формулу (9), находим, что до начала нормальной работы толщиномер пленок требуется  $t_n = 0,85$  ч. Это означает, что время подогрева прибора КТП-1А составляет 0,85 ч, после чего толщиномер будет нормально работать. В случае, когда кривые не имеют вид экспоненты, предельные значения влияющих величин определяются границей прямой (штриховая линия на рис. 11, 12).

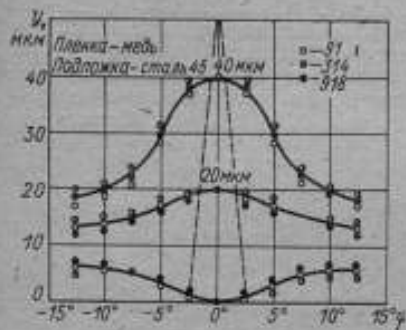


Рис. 11. Влияние угла наклона измерительного преобразователя на показания толщиномеров КТП-1А.

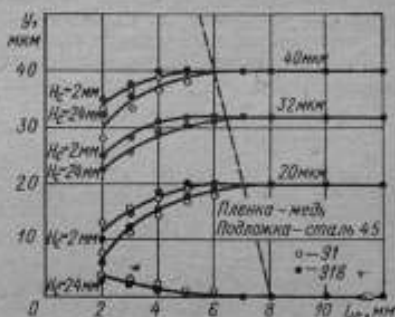


Рис. 12. Влияние высоты ступеньки и расстояния от оси измерительного преобразователя до края ступеньки на показания толщиномеров КТП-1А.

Найденные при исследованиях во ВНИИМ и в ГДР [2] пределы нормальных значений влияющих величин различных по принципу действия толщиномеров пленок приведены в табл. 5.

### Выводы

1. Толщину пленки измеряют с помощью толщиномеров, исходя из свойств материалов пленки и подложки.
2. При выпуске толщиномеров пленок уделяется мало внимания изучению влияющих величин, в результате чего в технических описаниях и в инструкциях по эксплуатации не указывается влияние свойств, формы и размеров пленки и подложки на показания толщиномеров.
3. При разработке методов и средств поверки толщиномеров пленок необходимо установить пределы значений влияющих величин, при которых основная и дополнительная погрешности толщиномеров не превышают допустимых пределов.
4. При разработке новых толщиномеров пленок предлагается проводить исследование влияния различных величин на показания толщиномеров с помощью описанных методов и предложенных средств. Целесообразно графики, построенные по результатам исследований, прилагать к техническому описанию прибора.
5. Поверка образцовых мер толщины пленок состоит в определении действительного значения средней толщины пленки на определенной площади поверхности подложки.



6. Большая неравномерность пленки по толщине делает невозможным применение для проверки толщиномеров всей поверхности пленки образцовой меры. Поэтому толщина пленки на образцовых мерах аттестуется только на площадках поверхности подложки, у которых неравномерность не превышает заданных значений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berndt K. H. Investigation of the Coersive Forces of Ni, Fe and Ni — Fe Films during Evaporation.— "Journal of Applied Physics", 1962, vol. 33, N 1, pp. 193—196.
2. Eckardt J. Magnetische Eigenschaften von dünnen Nickel — Eisen — Kobalt — Aufdampfschichten.— "Telefunken Zeitung", 1963, 36, N. 3/4, S. 119—126.
3. Богуславский М. Г., Лаанеотс Р. А. Об обеспечении единства измерений толщин пленок. «Измерительная техника», 1970, № 5.
4. Кудряшова Ж. Ф., Рабинович С. Г., Резник К. А. Рекомендация по методам обработки результатов наблюдений при прямых измерениях.— Труды метрологических институтов СССР, вып. 134(194), Изд. Стандартов, М.—Л., 1972, 177 с.

УДК 531.715.1 : 531.5

Я. М. Кандель\*, С. И. Торопин

ВНИИМ

#### ИЗМЕРЕНИЕ ПРИВЕДЕННОЙ ДЛИНЫ МАЯТНИКОВ ПРИ АБСОЛЮТНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЯХ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Точность абсолютных измерений ускорения силы тяжести  $g$  маятниковым методом ограничивается не только влиянием системы нож-опора маятника, но и точностью измерения приведенной длины. Конструкция маятников и аппаратуры для измерения приведенной длины постоянно совершенствовалась. Приведенные длины первоначальных конструкций обратных маятников с опорными призмами измерялись оптико-механическими компараторами. В современных маятниках опорами являются подушки, т. е. плоские пластины, жестко закрепленные на стержне маятника [1, 2]. В этом случае измерение приведенной длины осуществляют с помощью вспомогательных пластин, прижимаемых к подушкам маятника. Приведенная длина маятника, равная расстоянию между притертыми плоскостями пластины, измеряется методом сравнения с блоком концевых мер длины. Измерения осуществляются в воздухе (при горизонтальном положении маятника) контактным или интерференционным способом с погрешностью измерения длины не более 0,1 мкм.

В связи с тем, что в рабочем положении приведенная длина маятника отличается от измеренной в горизонтальном положении длины, в результаты измерения длины вносятся аналитически вычисленные поправки, учитывающие растяжение маятника под влиянием собственной массы, удлинение маятника в вакууме и деформацию подушки. Поскольку учет с требуемой точностью всех факторов, влияющих на деформацию материала маятника, невозможен, погрешности определения многих поправок, полученных расчетным путем, исходя из геометрических размеров, массы и упругих свойств материалов, обычно составляют 20% от значений самих поправок. Некоторые систематические погрешности определения поправок на приведенную длину маятника достигают 0,2 мкм, т. е. превышают инструментальные погрешности измерений приведенной длины маятника. Повышение точности измерения приве-

денной длины маятника возможно лишь при непосредственном измерении ее в вакуумной камере в рабочем положении маятника.

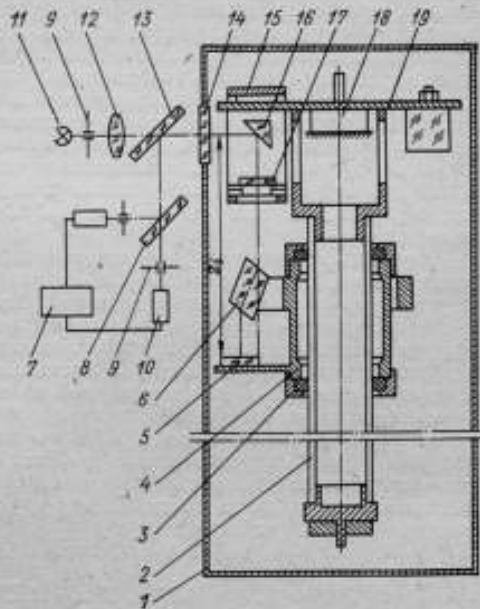
Так, измерение приведенных длин оборотных маятников при определении  $g$  в Потсдаме (в 1970 г.) осуществлялось специальным интерферометром методом сравнения с блоком концевых мер длины. В вакуумной камере находились маятник и блок концевых мер длины, что позволило уточнить поправку на растяжение маятника под влиянием его массы [3] и исключить поправку на удлинение маятника в вакууме. В результате измерений вошли поправки на удлинение блока концевых мер в вакууме и деформацию подушки [4], и поэтому точность измерения приведенной длины маятника повысилась незначительно.

В дифференциальном маятнике с одной системой призма-подушка [5], позволяющем исключить влияние опоры на результаты измерения  $g$ , нет возможности измерить разность приведенных длин в рабочем положении маятника в вакуумной камере.

В предложенной авторами конструкции дифференциального маятника [6, 7] возможно измерение разности приведенных длин маятника непосредственно в вакуумной камере. Изображенный на рисунке маятник представляет собой кварцевый трубчатый стержень 2, в верхней части которого на планке 19 укреплен опорная призма 18. На планке установлена также регулируемая трубчатая оправа 15 зеркала 16. К трубчатой оправе крепится полупрозрачное зеркало 17. Каретка маятника 4, снабженная двумя цапговыми фторопластовыми подшипниками 3, перемещается вдоль стержня 2 с помощью специального поводка; ее фиксация на стержне осуществляется силами трения. На каретке укреплено зеркало 5 и плоскопараллельная планка 6.

Серийный ОКГ-13, используемый в качестве источника монохроматического света 11, коллиматор 12, полупрозрачные пластины 13 и 8, щели 9, фотоприемники 10 и реверсивный счетчик интерференционных полос 7 совместно с зеркалами 5, 16, 17 составляют фотоэлектрический интерферометр Физо, позволяющий измерять перемещения центра тяжести каретки вдоль стержня маятника. Маятник, интерференционные зеркала и механизм перемещения каретки (на рисунке не показан) находятся в вакуумной камере 1 с прозрачным окном 14, а осветительная и регистрирующая части интерферометра расположены за пределами вакуумной камеры, на общем с ней основании.

Как известно [5], разность приведенных длин дифференциального маятника есть функция величины перемещения центра тяжести каретки относительно оси колебания. Стержень маятника и каретка сбалансированы, их центры тяжести лежат на одной линии, совпадающей с осью маятника. В данной конструкции линия измерения интерферометра не совпадает с осью



Вакуумный интерферометр дифференциального гравиметрического маятника

маятника, и параллельна ей, т. е. принцип Аббе не соблюден. Для исключения из результатов измерений компараторной погрешности, вносимой наклонами каретки при ее перемещении вдоль стержня, на каретке установлена пластина б, компенсирующая компараторную погрешность интерферометра [8].

Методика измерения разности приведенных длин маятника в основном совпадает с методикой, описанной в работах [5, 7], и здесь не рассматривается. Остановимся лишь на двух особенностях измерения разности приведенных длин с помощью описанного маятника.

Установка каретки в крайнем верхнем положении, на расстоянии  $z_1'$  от оси вращения маятника, производилась при атмосферном давлении; величина  $z_1'$  измерялась штангенциркулем, затем включался интерферометр и откачивался воздух из вакуумной камеры. Изменение оптической длины пути  $\Delta z_1$  измерялось интерферометром. Расстояние  $z_1$  от центра тяжести каретки до оси вращения маятника определялось разностью  $z_1 = z_1' - \Delta z_1$ .

Перемещение каретки вдоль стержня маятника на расстояние  $z_2'$  от оси вращения маятника производилось также при атмосферном давлении; величина перемещения измерялась интерферометром. После остановки каретки вновь из вакуумной камеры откачивался воздух и измерялось изменение оптической длины пути  $\Delta z_2$ . Расстояние от центра тяжести каретки до оси вращения определялось как  $z_2 = z_2' - \Delta z_2 + z_1$ . Аналогичным путем определяется расстояние  $z_2$ .

Наибольшая разность приведенных длин дифференциального маятника равна 200 мм, ход каретки 510 мм; средняя квадратическая погрешность измерения разности приведенных длин не превышает 0,3 мкм.

В настоящее время погрешность измерения разности приведенных длин дифференциального маятника определяется в основном дискретностью счетчика интерференционных полос и нестабильностью длины волны ОКГ. Поправки на разность приведенных длин не вносятся, так как она измеряется непосредственно в вакуумной камере, в рабочем положении маятника, в длинах световых волн. Применение ОКГ со стабилизированной длиной волны и счетчика, обеспечивающего отсчет дробных частей интерференционных полос, даст возможность повысить точность измерения разности приведенных длин маятника до уровня точности измерения длины пути падающего тела при баллистических определениях  $g$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Pendulum for gravity determination.** Патент США № 324734, кл. 73—382. *Off Gazett*, 1966, v. 824, № 5.
2. **Cook A. H.** The Absolute Determination of the Acceleration Due to Gravity.—*Metrologia*, 1965, vol. 1, N 3, July, 177 p.
3. **Elstner G., Fischer H., Frey R., Harnisch G., Schüler R.** Absolute Schweremessungen in Potsdam.—*Vermessungstechnik*, 18 ig 1970, Heft 4, S. 128—131.
4. **Schüler R., Fischer H., Frey R., Harnisch G.** Absolute Schweremessungen mit Reversionspendeln in Potsdam.—*Vermessungstechnik*, 18 ig 1970, Heft 12, S. 451—453.
5. **Торопин С. И.** Дифференциальный маятник с одной системой призматической подставки. Труды ВНИИМ, вып. 23 (83), Машгиз, 1954, с. 5—17.
6. **Торопин С. И., Кандель Я. М.** Маятник для гравиметрических измерений. Авт. свид. № 278142, «Бюлл. изобретений», 1970, № 25.
7. **Кандель Я. М., Торопин С. И.** Усовершенствование маятникового метода абсолютного определения ускорения силы тяжести. Труды метрологических институтов СССР, вып. 139 (199), 1972, с. 68—71.
8. **Кандель Я. М.** Интерференционный компаратор. Авт. свид. № 301520, «Бюллетень изобретений», 1971, № 14.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

### ПРИБОРЫ С СУММИРУЮЩИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДИАМЕТРОВ ОТВЕРСТИЙ

Для измерения диаметров отверстий с погрешностью 1—3 мкм применяются контактные приборы типа оптиметра, у которых один наконечник неподвижный, а второй соединен с измерительным устройством.

Попытки уменьшить погрешность измерения на этих приборах за счет применения более чувствительного измерительного устройства не дают существенного повышения точности, так как не исключаются другие составляющие погрешности измерения, свойственные данной схеме прибора [1].

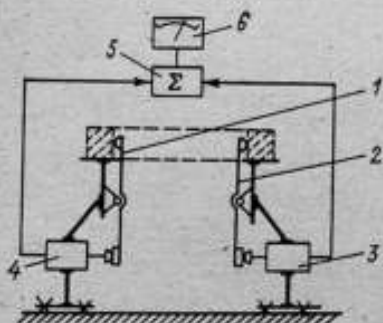


Рис. 1. Схема суммирования с двумя измерительными преобразователями

1, 2 — измерительные рычаги; 3, 4 — измерительные преобразователи перемещения; 5 — суммирующий блок; 6 — отсчетное устройство

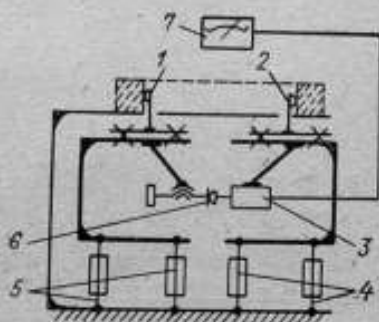


Рис. 2. Схема суммирования с одним измерительным преобразователем

1, 2 — измерительные наконечники; 3 — преобразователь перемещения; 4, 5 — пружины параллелограммов; 6 — регулируемый упор; 7 — отсчетное устройство

Точность подобных приборов можно значительно повысить, если в качестве измерительного устройства использовать суммирующие измерительные механизмы. Тогда оба измерительных наконечника будут являться чувствительными элементами общей измерительной системы. Это позволит упростить установку детали на позицию измерения, существенно уменьшить погрешность от измерительного усилия и исключить необходимость крепления блока концевых мер в струбине.

На рис. 1 и 2 представлены варианты схем контактных приборов для измерения диаметров отверстий с суммированием.

Для практической реализации первой схемы (рис. 1) необходим суммирующий блок с двумя преобразователями перемещения (пневматическими, индуктивными и др.). Погрешность суммирующего измерительного устройства не должна превышать 0,2 мкм. Суммирующие устройства, имеющие такую погрешность, выпускаются Московским заводом «Калибр», например модели: 207, 212, 215, 216.

Вторая схема (рис. 2) более простая. Основу схемы составляют два пружинных параллелограмма, несущих измерительные наконечники 1, 2, преобразователь перемещения 3 и регулируемый упор 6.

Масса подвижных частей параллелограмма должна быть минимальна, во избежание продольного изгиба плоских пружин. Поэтому для получения высокой точности целесообразно применять малогабаритные преобразователи — например модели 223.

Особый интерес может представить использование в приборе, вместо преобразователя 3, измерительного механизма с упругим кинематическим элемен-

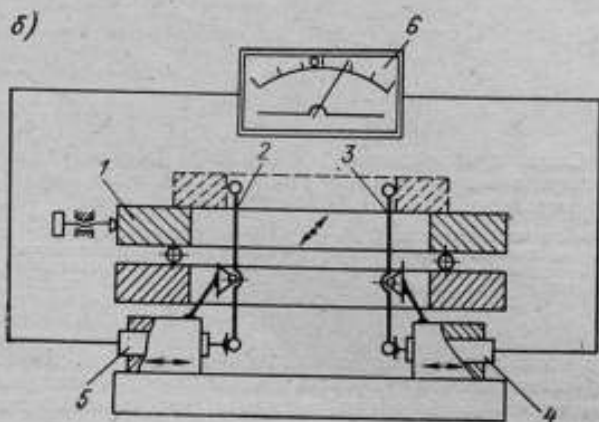
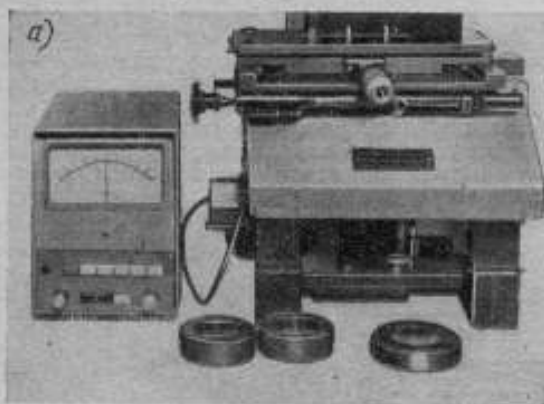


Рис. 3. Прибор для измерения диаметров отверстий с суммирующим электронным устройством: а — общий вид; б — принципиальная схема прибора

том [2], представляющим собой упругую скрученную ленту. Концы ленты соединяются с подвижными каретками параллелограммов. Такой механизм позволяет сравнительно просто получить оптимальное измерительное усилие ( $5 \div 20$  сН) при сохранении высокой точности.

Для проведения экспериментальных исследований был изготовлен опытный образец прибора (рис. 3), основными узлами которого являются: регулируемый предметный стол (1), рычажный механизм и суммирующее электронное измерительное устройство.



Предметный стол 1 имеет паз для перемещения измерительных рычагов 2 и 3. Рычаги соединены с индуктивными преобразователями 4 и 5, установленными в каретках, которые могут перемещаться вдоль линии измерения. Индуктивные преобразователи (мод. 222) связаны с электронным блоком 6, выполняющим алгебраическое суммирование сигналов, поступающих от индуктивных преобразователей.

Цена деления отсчетного устройства прибора регулируется и может быть установлена следующей: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5 мкм.

Измерения на приборе относительные — диаметр отверстия сравнивают с размером блока концевых мер, собранным в виде скобы.

Процесс измерения на приборе аналогичен измерению на горизонтальном оптиметре, измерительной машине и других приборах, предназначенных для измерения диаметров отверстий.

Настройка прибора на размер может осуществляться двумя способами: 1) блок концевых мер прижимают к упору, базированная плоскость которого перпендикулярна линии измерения; 2) блок поворачивают до получения его наименьшего размера.

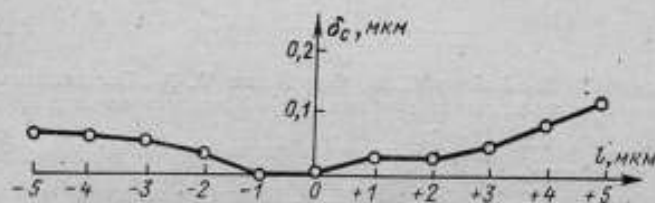


Рис. 4. График погрешности суммирования измерительного устройства опытного образца прибора

Точность первого способа ограничивается жесткими требованиями к перпендикулярности образующей кольца к основанию и недостаточной прямолинейностью и параллельностью направляющих предметного стола. Поэтому для опытного образца прибора была принята вторая схема настройки.

Проведенные исследования показали, что при наличии отсчетного устройства с ценой деления 0,1 мкм, опытный оператор может установить блок концевых мер с погрешностью не ниже 0,05 мкм.

Исследования и другие составляющие суммарной погрешности измерения — погрешности измерительного устройства, блока плоскопараллельных концевых мер длины, температуры, измерительного усилия, установки кольца на позицию измерения.

Доминирующими оказались погрешность измерительного устройства 0,2 мкм и погрешность блока концевых мер, которая в зависимости от разряда и длины мер может составлять 0,1 мкм и более. Остальные составляющие погрешности не превышали 0,05 мкм.

Погрешность измерительного устройства в основном определяется погрешностью суммирования, обусловленной различием статических характеристик измерительных преобразователей. Эта погрешность для данной схемы прибора легко определяется экспериментально — по изменению показаний при перемещении кольца или блока концевых мер длины по длине измерения.

На рис. 4 приведен график распределения погрешности суммирования  $\delta_c$  у опытного образца прибора в пределах шкалы  $l = \pm 5$  мкм. Максимальная погрешность суммирования  $\delta_c = 0,12$  мкм.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований прибора показали, что при применении плоскопараллельных концевых мер длины 2-го разряда доверительная погрешность измерения на приборе при цене деления 0,1 мкм может не превышать

$$\delta_{\text{пр}} = \pm (0,3 + 3D) \text{ мкм,}$$

где  $D$  — диаметр измеряемого отверстия, м.

При исследовании опытного образца измерялись диаметры отверстий 12, 16 и 25 мм с помощью концевых мер 2-го разряда. Результаты измерения сопоставлялись с результатами измерения, полученными на интерференционном приборе ИЗК-61 [3]. В таблице приведены результаты измерения, средние из трех наблюдений.

Результаты измерения диаметров отверстий

Номинальный размер отверстия, мм	Измерительный прибор	
	ИЗК-61	Опытный образец
12	11,99145	11,9912
16	16,00060	16,0007
25	25,00332	25,0031

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Н. Н., Кайнер Г. Б., Сацердотов П. А. Погрешность и выбор средств при линейных измерениях. М., «Машиностроение», 1967, 390 с. с ил.
2. Цейтлин Я. М. Упругие кинематические устройства. М., «Машиностроение», 1972, 295 с. с ил.
3. Коломийцев Ю. В., Смирнова Г. Г. Интерференционный метод и прибор для измерения внутренних размеров деталей.— «Оптико-механическая промышленность», 1969, № 5, с. 33—37.

Поступила в редакцию 2/IX 1975 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Ю. П. Ефремов, Н. А. Калинин, Л. К. Каяк. Система эталонов единицы длины	3 ✓
М. Л. Брожесинский, Г. В. Симахина. Государственный перачный эталон метра	7 ✓
В. Т. Мартынов. Аттестация высокоточных лимбов	11
В. П. Капралов. Стабилизация длин волн излучения газовых лазеров методом сравнения с мерой частоты	17
Н. В. Трофимова, Я. А. Райхман, В. И. Чушлиб. Интерференционная установка для измерения шкал счетом интерференционных полос	25
Л. К. Каяк, В. М. Хавинсон, О. Ю. Шошина. Рекомендация МОЗМ «Плоскопараллельные концевые меры длины»	32
Л. Ф. Хавинсон. О погрешностях абсолютных интерференционных измерений длины концевых мер	38 ✓
П. П. Алексеев, Л. К. Каяк, Н. В. Тришин, О. В. Ячменцев. Погрешности измерений на фотоэлектрическом компараторе ФЭК-1000	41
В. М. Хавинсон. О выборе схемы лазерного интерференционного компаратора	45 ✓
В. Г. Цорин. Особенности оптических схем интерференционных дилатометров	49
М. Г. Богуславский, А. М. Казан. Высокоточный бесконтактный метод регистрации положения зеркально-отражающей поверхности объектов при линейных и угловых измерениях	57
М. Г. Богуславский, В. Ц. Вольперт. Автоколлимационная установка с автоматическим наведением для сличения образцовых многогранных призм	64
В. В. Копытов, В. Д. Лизунов. Автоколлимационный прибор для калибровки многогранных призм	73
Л. Ю. Абрамова, Е. П. Анучин, М. Г. Богуславский, Ю. С. Миронов. Исследование образцовых установок для проверки средств измерения длин в динамическом режиме	79
С. Б. Тарасов. Исследование виброустойчивости рычажно-зубчатых и пружинных измерительных приборов	86
Г. Я. Гафанович, Б. А. Лихтциндер, О. В. Прусихин, Я. М. Цейтлин. Метрологические задачи контроля отклонений формы поверхностей	89
В. В. Леонов. О шаговом методе измерения непрямолинейности	97
М. Г. Богуславский, Р. А. Лаанеотс. Исследования методов и средств проверки толщиномеров пленок (покрытий)	101
Я. М. Кандель, С. И. Горюпин. Измерение приведенной длины маятников при абсолютных определениях ускорения силы тяжести	112
А. И. Крицын. Приборы с суммирующим измерительным устройством для измерения диаметров отверстий	115

## РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 531.711 : 621.373.826.072.6

Система эталонов единицы длины. Ефремов Ю. П., Каллини Н. А., Кайх Л. К.—«Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 3—6.

Рассмотрено состояние эталонов единицы длины: перачного, эталон-копий, рабочих эталонов, а также вопросы, связанные с новым определением единиц длины — метра, основанного на излучении газовых лазеров. Библ. 9.

УДК 531.711.088.6

Государственный первичный эталон метра. Бржезинский М. Л., Симахин А. Г. В.—«Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 7—11.

Приводится анализ погрешностей всего комплекса измерительных средств при воспроизведении единицы длины — метра на эталонной установке. Показано, что снижение отдельных составляющих погрешностей до возможного предела не приводит к существенному повышению точности вторичных эталонов — штриховых мер длины.

Показано, что точность аттестации рабочих эталонов в настоящее время удовлетворяет запросам промышленности. Приводятся также сведения о новых путях для повышения точности эталона длины. Библ. 8.

УДК 531.74.089.68

Аттестация высокоточных лимбов. Мартынов В. Т.—«Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 11—17.

Статья посвящена вопросу аттестации высокоточных лимбов до их установки в угломерный прибор. Дано описание конструкции макета установки для аттестации лимбов. Особенностью конструкции установки является наличие четырех фотоэлектрических микроскопов, что позволяет получать непосредственно разность углов между поверяемыми диаметрами и контрольным углом. На установке производится аттестация лимбов с погрешностью, не превышающей  $0,1''$ , методами сличения и калибровки. Диаметры лимбов, аттестуемых на установке 60—300 мм. Табл. 1. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 621.373.826.038.823.072.6:621.317.361.089.68

Стабилизация длины волны излучения газовых лазеров методом сравнения с мерой частоты. Капранов В. П.—«Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 17—25.

Рассмотрены некоторые методы синхронизации излучения лазеров с частотой квантовой меры эталона времени, которые позволяют повысить стабильность и воспроизводимость длины волны излучения. Дан анализ устройств синхронизации и приведены экспериментальные результаты синхронизации излучения гелий-неонового лазера ( $\lambda=633$  нм) с частотой  $\Omega_0$ -перехода в пучке атомов  $^{133}\text{Cs}$ , возбуждаемого в атомно-лучевом радиоспектроскопе пассивного квантового стандарта частоты радиодиапазона. Табл. 1. Ил. 4. Библ. 35.

УДК 535.412.087.9:681.787.7

**Интерференционная установка для измерения шкал счетом интерференционных полос.** Трофимова Н. В., Райхман Я. А., Чухлиб В. И. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 25—32.

Приводится описание интерференционной установки для измерения шкал счетом интерференционных полос. В установке использован принцип двухлучевого интерферометра Майкельсона с зеркалами на подвижных каретках. Преобразование светового потока в электрические сигналы осуществлено по четырехканальной системе. Наименьшая цена импульса  $\lambda/32$ . Имеется цифровая индикация и автоматическая регистрация результатов, а также программное управление каретки по величине шага, числу задаваемых шагов и отсчетов. Наведение на штрих производится с помощью фотозлектрического микроскопа с погрешностью, не превышающей 0,01—0,02 мкм. Погрешность измерения шкал не превышает 0,1 мкм. Ил. 6. Библ. 7.

УДК 531.711.51(083.76):351.521

**Рекомендация МОЗМ «Плоскопараллельные концевые длины».** Квик Л. К., Хавинсон Л. Ф., Шошина О. Ю. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 32—38.

Дан обзор основных положений существующих нормативных документов разных стран по концевым мерам длины и изложены требования, устанавливаемые в рекомендации № 30 МОЗМ «Плоскопараллельные концевые меры длины», принятой в 1973 г. Генеральной конференцией. Табл. 3.

УДК 531.711.5.088

**О погрешностях абсолютных интерференционных измерений длин концевых мер.** Хавинсон Л. Ф. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 38—40.

Изложена методика определения толщины притирочного слоя  $t$  и поправки на разнородность материала измерительных поверхностей концевой меры и вспомогательной пластины.

Приведены экспериментальные результаты измерений  $\frac{\sigma_L}{L}$  для стальных концевых мер и пластин из стекла К-8. Для  $\frac{\sigma_L}{L}$  получены значения от 0,029 до 0,044 мкм; для  $t$  — от 0,012 до 0,025 мкм. Библ. 11.

УДК 531.713.082.52.088

**Погрешности измерений на фотозлектрическом компараторе ФЭК-1000.** Алексеев П. П., Квик Л. К., Тришина Н. В., Ячменцев О. В. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 41—45.

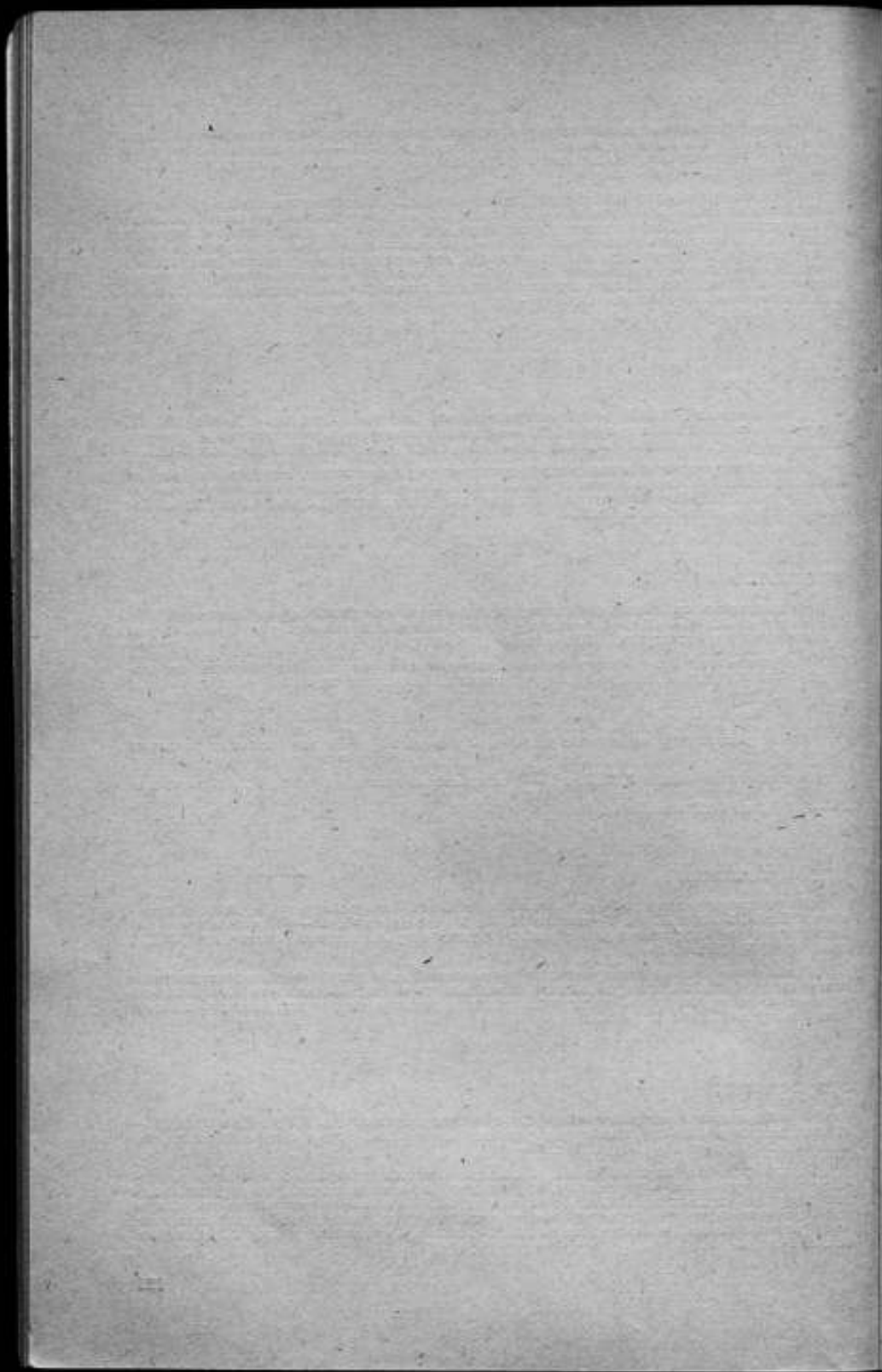
Приводятся исследования основных погрешностей измерений на фотозлектрическом компараторе ФЭК-1000, которое позволило определить не только суммарную погрешность измерений, но и установить допустимые пределы влияния различных факторов на точность измерений. Табл. 2. Библ. 2.

УДК 531.713.082.54

**О выборе схемы лазерного интерференционного компаратора.** Хавинсон В. М. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 45—49.

Рассматривается влияние схемного решения интерференционного лазерного компаратора на погрешность измерения длины, вызванную непрямолинейностью направляющих и изменением внешних условий за время измерений. На основании приведенного анализа кратко сформулированы общие требования к схеме и компоновке интерференционного лазерного компаратора, позволяющие свести погрешность измерения длины к минимуму. Ил. 1. Библ. 5.





Г  
И  
Ж  
Л  
М  
Н  
О  
П  
Р  
С  
Т  
У  
Ф  
Х  
Ц  
Ч  
Ш  
Щ  
Ъ  
Ы  
Ь  
Э  
Ю  
Я  
а  
б  
в  
г  
д  
е  
ж  
з  
и  
к  
л  
м  
н  
о  
п  
р  
с  
т  
у  
ф  
х  
ц  
ч  
ш  
щ  
ъ  
ы  
ь  
э  
ю  
я

УДК 620.181.428.4.05.082.54

Особенности оптических схем интерференционных dilatометров. Цорли В. Г.— «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 49—56.

Анализируются факторы, снижающие контрастность интерференционной картины dilatометров, вызывающие уменьшение точности измерений. Приводятся практические рекомендации по устранению влияния этих факторов при юстировке интерференционных dilatометров. Ил. 4. Библ. 6.

УДК 631.748:681.786.3

Высокоточный бесконтактный метод регистрации положения зеркально-отражающей поверхности объектов при линейных и угловых измерениях. Богуславский М. Г., Кага и А. М.— «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 67—64.

Кратко изложены результаты анализа и исследований бесконтактного метода регистрации границы зеркально-отражающей поверхности (верфлектометра). Описывается новый метод фотоэлектрического верфлектометра, приводятся основные соотношения и результаты исследований. Ил. 7. Табл. 2. Библ. 13.

УДК 681.777.5—62:535.315.089.6

Автоколлимационная установка с автоматическим наведением для сличения образцовых многогранных призм. Богуславский М. Г., Вольперт В. Ц.— «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 64—73.

Приводится описание и результаты исследования автоколлимационной установки с автоматическим наведением и цифровым отсчетом показаний. Установка предназначена для поверки образцовых многогранных призм 1-го и 2-го разрядов с погрешностью  $\pm 0,3''$ . Ил. 6. Библ. 6.

УДК 631.74.748.389.001.6

Автоколлимационный прибор для калибровки многогранных призм. Копытов В. В., Лизунов В. Д.— «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), с. 73—78.

Предложен прибор для калибровки многогранных призм с одним автоколлиматором и блоком зеркал. Рассмотрено влияние различных факторов на погрешность измерений. Приведены результаты исследований. Табл. 1. Ил. 4. Библ. 5.

УДК 531.71.089.62—501.22

Исследование образцовых установок для поверки средств измерения длины в динамическом режиме. Абрамова Л. Ю., Анучин Е. П., Богуславский М. Г., Мигринов Ю. С.— «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 79—86.

Рассматривается комплекс поверочных установок для поверки и исследования средств контроля линейных размеров, работающих в динамическом режиме. Анализируются особенности реализации методов поверки такого рода приборов, влияние на них вибрационных возмущений. Рассмотрены режимы, имитирующие условия работы приборов автоматического контроля и самоиспущных приборов. Дан краткий анализ погрешностей описываемых установок. Табл. 3. Ил. 5. Библ. 5.

УДК 681.2—752

Исследование виброустойчивости рычажно-зубчатых и пружинных измерительных приборов. Тарасов С. В.— «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 86—89.

Рассматривается влияние воздействия вибраций на рычажно-зубчатые и пружинные измерительные приборы и оценивается их виброустойчивость. Ил. 2.

У

л  
с  
т

п  
р  
к  
Б

У

и  
и

м  
р  
г

УД

с  
н

дл  
ле  
нз  
ре

УД

сн  
нм  
Тр

аб  
дн

УД

от  
Тр

ро  
в  
об

Нл

УДК 531.717.2

Метрологические задачи контроля отклонений формы поверхностей. Гафаниович Г. Я., Лихтандер В. А., Прусихин О. В., Цейтлин Я. М. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 89—97.

Дан анализ методов математического описания, средств и методов контроля отклонений формы реальных поверхностей от заданной. Показаны недостатки метрологического обеспечения в этой области. Обоснована целесообразность создания как специальных образцовых средств для воспроизведения единицы длины в области контроля параметров криволинейных поверхностей, так и специального эталона единицы кривизны. Ил. 3. Библ. 9.

УДК 531.717.82

О шаговом методе измерения непрямолинейности. Леснов В. В. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 97—101.

Рассмотрена задача определения рельефа рабочей поверхности поверочной или разметочной плиты. Полученное решение позволяет путем автоматизированной обработки результатов измерений найти отклонение рельефа проверяемой поверхности от вспомогательной плоскости, ориентированной относительно проверяемой.

УДК 531.717.5.088

Исследования методов и средств поверки толщиномеров пленок (покрытий). Богуславский М. Г., Лавинов Р. А. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 101—112.

Исследуется влияние различных параметров образцовых мер на показания прибора для измерения толщины пленок при его поверке. Описываются разработанные и изготовленные средства для определения нормальных значений влияющих величин. Сопоставляются результаты исследования отечественных толщиномеров, проведенные во ВНИИМ, и результаты исследований толщиномеров ГДР. Табл. 5. Ил. 12. Библ. 4.

УДК 531.715.1:531.5

Измерение приведенной длины маятников при абсолютных определениях ускорения силы тяжести. Кандель Я. М., Торопин С. И. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 112—114.

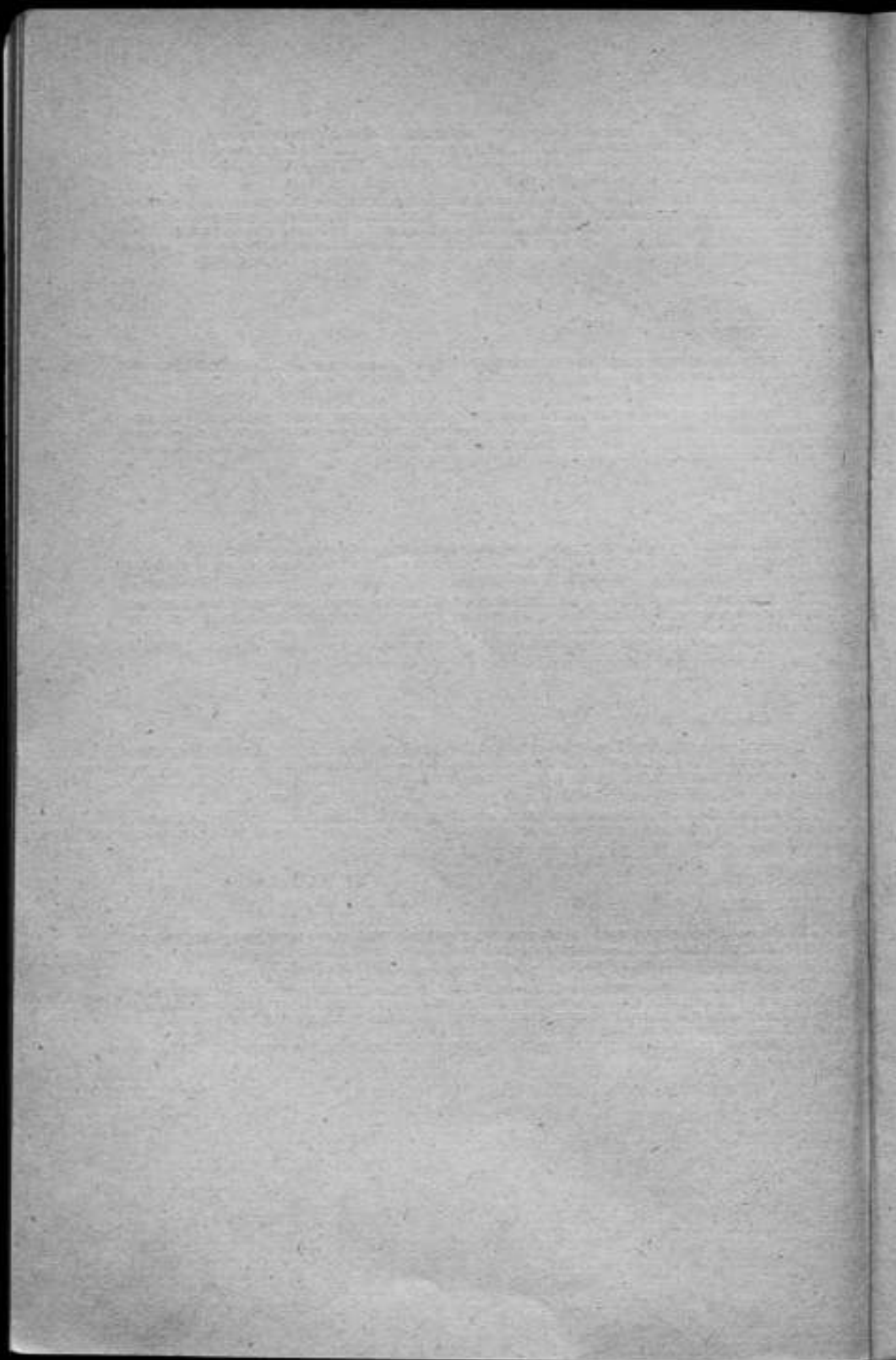
Дан краткий обзор методов измерения приведенной длины оборотных маятников при абсолютных определениях ускорения силы тяжести. Описан вакуумный интерферометр дифференциального гравиметрического маятника. Ил. 1. Библ. 8.

УДК 531.12.683.8

Приборы с суммирующим измерительным устройством для измерения диаметров отверстий. Крицын А. И. — «Исследования в области линейных и угловых измерений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 199 (259), 1976, с. 115—118.

Рассмотрены принципиальные схемы приборов с суммирующим измерительным устройством для измерения диаметров отверстий. Особенность таких приборов заключается в том, что у них оба измерительных наконечника являются чувствительными элементами общей измерительной системы.

Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Табл. 1. Ил. 4. Библ. 3.





**ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ОБЛАСТИ ЛИНЕЙНЫХ  
И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Труды метрологических институтов СССР**

**Выпуск 199 (259)**

Редакторы *Г. А. Митарчук,  
Л. Ф. Садовская, И. А. Шайкевич*  
Технический редактор *В. И. Ботикова*

Сдано в набор 22/VI 1976 г. Подписано к печати 3/XI 1976 г.  
М-23282. Формат 80×90<sup>1/16</sup>. Бумага типографская № 3.  
Печ. л. 8. Уч.-изд. л. 10,75. Тираж 1000 экз. Заказ № 1393.  
Цена 72 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия»,  
192041, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома при Го-  
сударственном комитете Совета Министров СССР по делам  
издательства, полиграфии и книжной торговли.  
195126, Ленинград, Ф-126, Социалистическая ул., 14.



**ГОТОВЯТСЯ К ИЗДАНИЮ СЛЕДУЮЩИЕ КНИГИ**

**Адиев Т. М., Мелик-Шахназаров А. М., Шайн И. Л.**  
**Автокомпенсационные измерительные устройства переменного тока.** 19 л. с ил. Ориентировочная цена 1 р. 10 к.

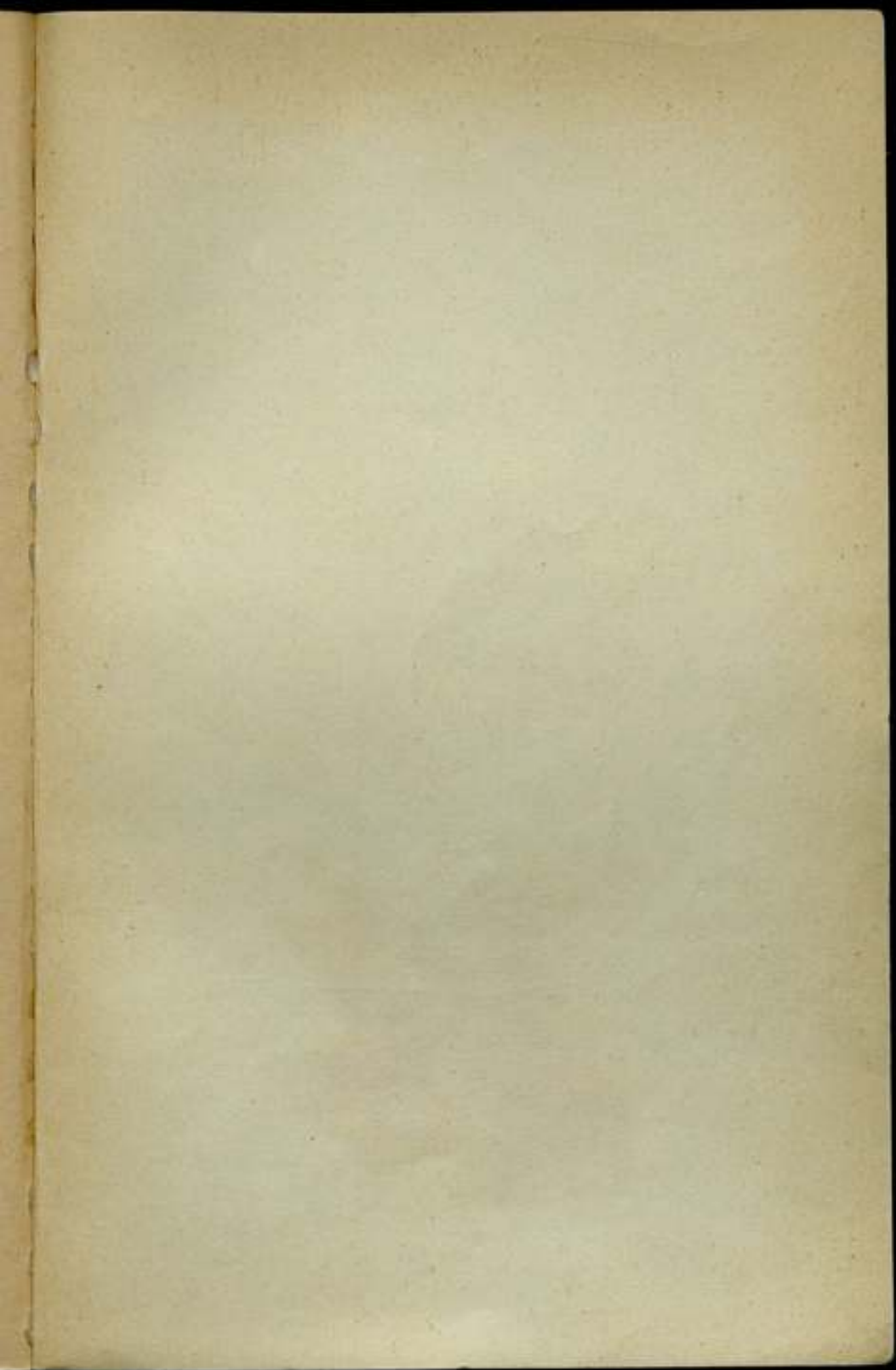
Автокомпенсационные измерительные устройства получают все большее применение в системах автоконтроля и информационно-измерительной технике. В монографии рассматривается широкий круг вопросов принципа действия, методов построения, основных свойств, особенностей и областей применения различных автокомпенсационных систем. Особое внимание уделяется вопросам построения цифровых автокомпенсационных систем, повышению метрологических и эксплуатационных свойств последних.

Книга предназначена для специалистов, работающих в области информационно-измерительной техники, разработки средств автоматики и элементов автоматизированных систем управления.

**Лихтциндер Б. Я., Широков С. М.**  
**Многомерные измерительные устройства.** 16 л. с ил. Ориентировочная цена 94 к.

В книге рассматривается новый класс измерительных устройств — многомерные мосты и компенсаторы, позволяющие измерять параметры электрических многополюсников и других многосвязных объектов методами сравнения. Освещаются принципы построения и основные свойства автоматических многомерных измерительных устройств, определяются условия устойчивости и сходимости различных алгоритмов их уравнивания, предлагаются методы оценки и нормирования погрешностей таких устройств. Описывается ряд разработанных приборов этого класса.

Книга предназначена для специалистов в области информационно-измерительной техники и автоматики и может быть полезна студентам и аспирантам соответствующих специальностей.



Цена 72 коп.