

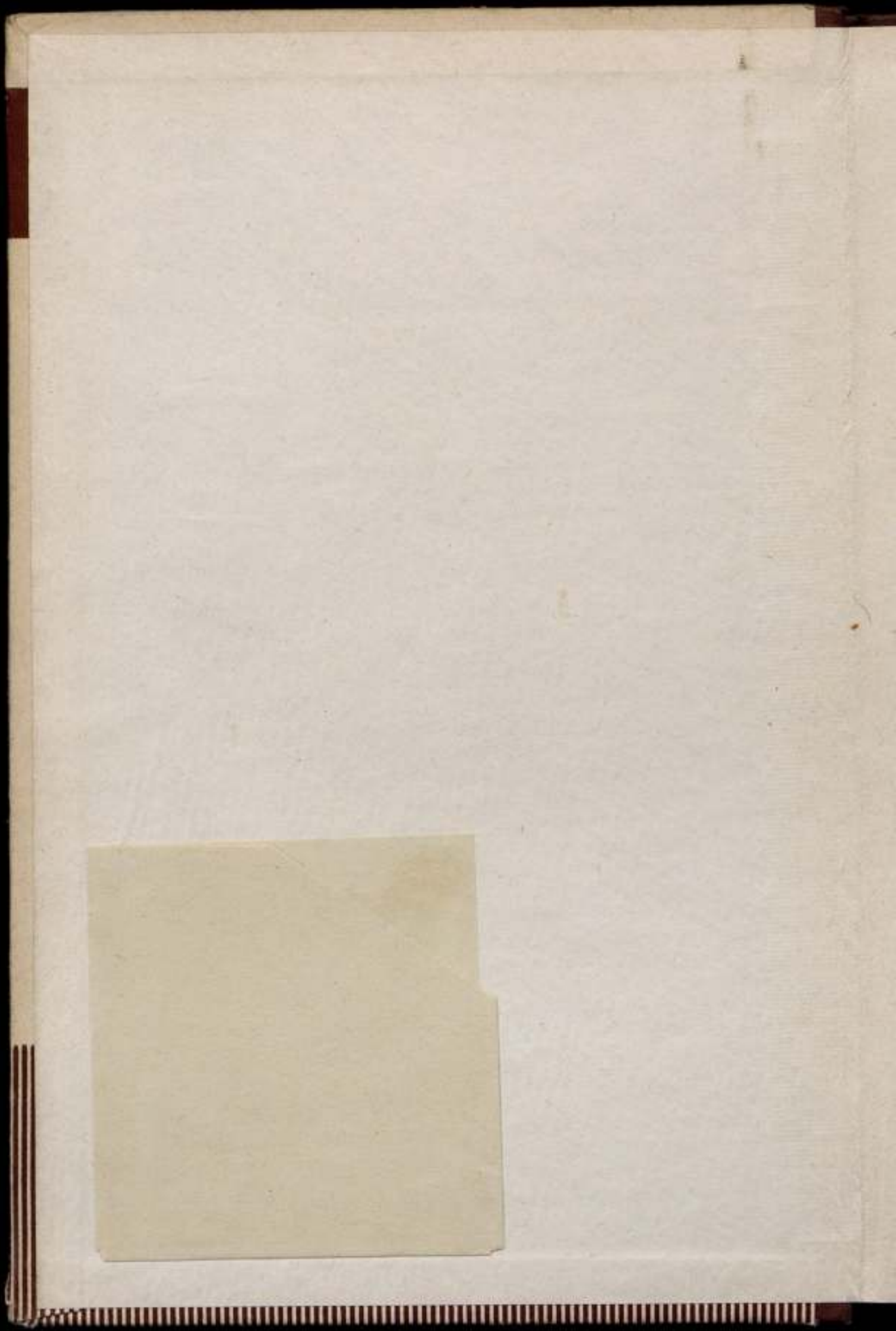
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

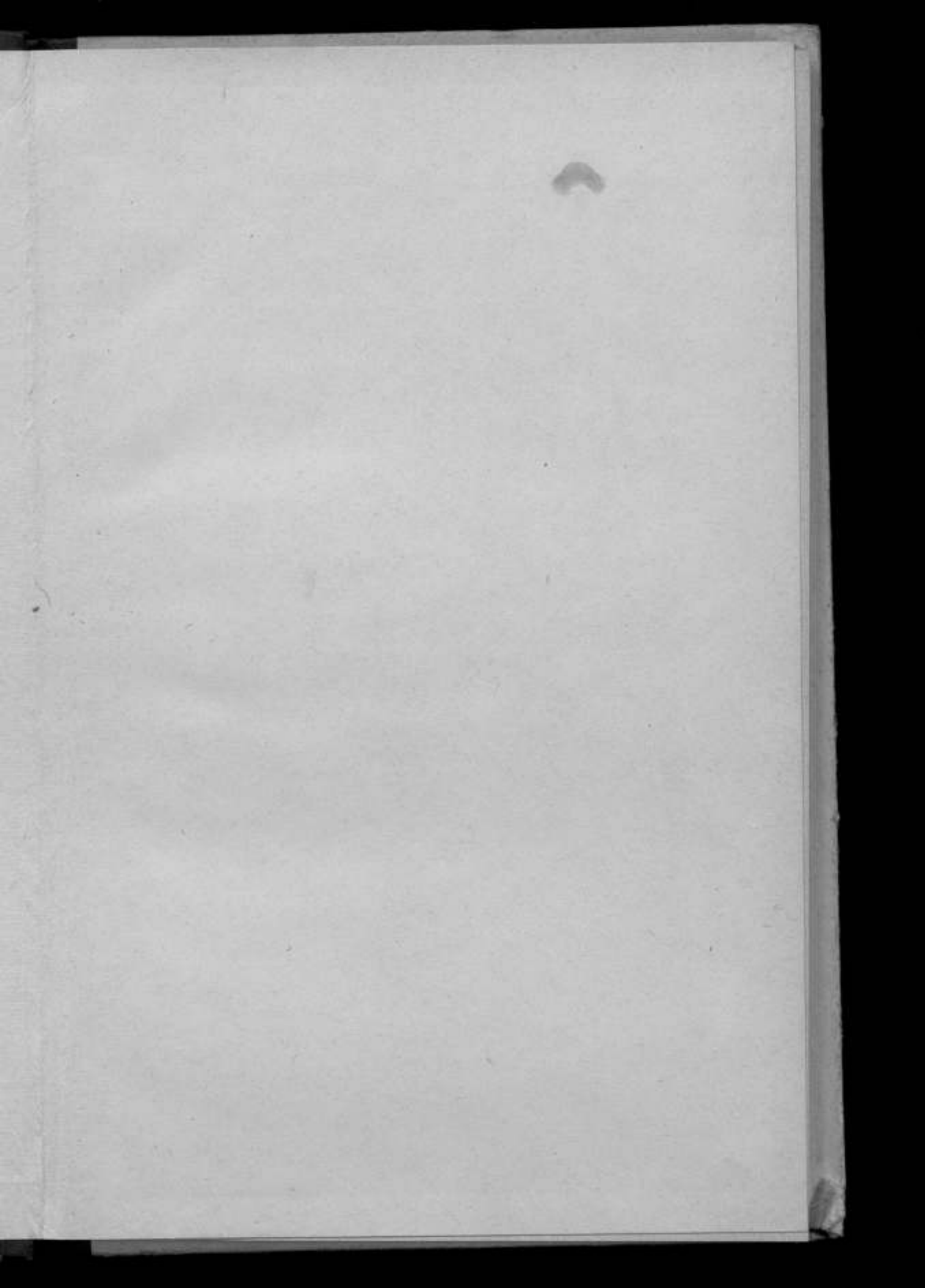
ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

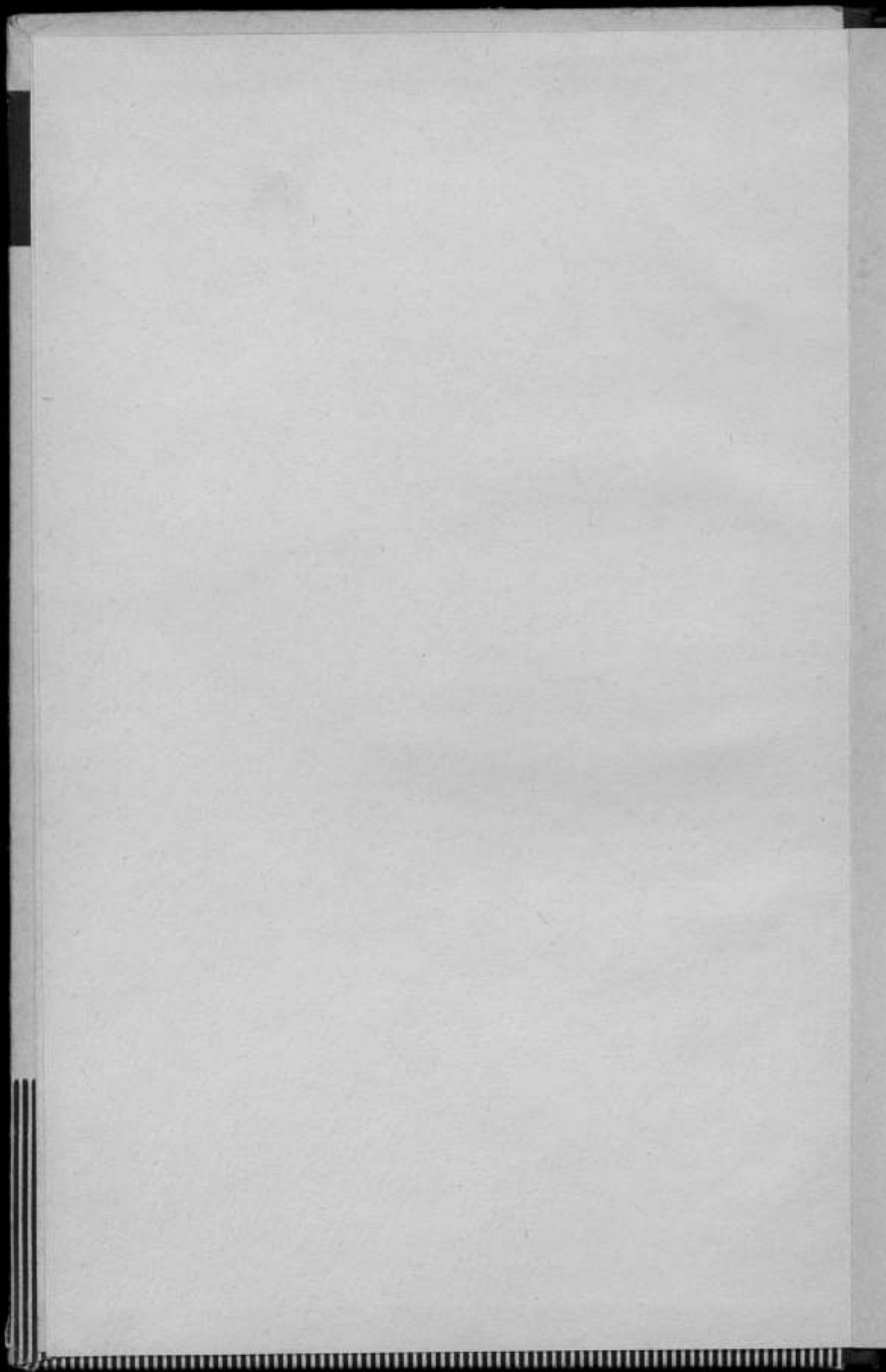
ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

161
ВЫПУСК 101 (151)









ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

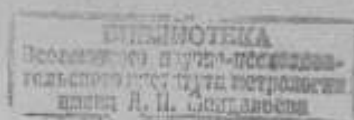
1976
29/11/88

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

161

ВЫПУСК 101 (151)

Под редакцией
канд. техн. наук Л. К. КАЯКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1968

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

В. О. Арутюнов (председатель), Н. Н. Александрова
(секретарь), А. Н. Гордов, П. Н. Горюнов,
Е. Ф. Долинский, А. И. Карташев, Л. К. Каяк,
И. И. Киренков, Д. К. Коллеров, Б. Н. Олейник
(зам. председателя), Б. Е. Рабинович, К. П. Широков,
Е. Г. Шрамков, М. Ф. Юдин, Б. М. Яновский

Ответственный редактор
д-р техн. наук проф. В. О. АРУТЮНОВ

ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборнике приведены результаты исследований в области линейных измерений, выполненных за последние годы в лабораториях ВНИИМ и других институтов.

В основу некоторых из публикуемых статей положены доклады, прочитанные на совещании по методам и приборам для измерений длины и углов, состоявшемся в Ленинграде в апреле 1966 года.

Наиболее важными эталонными работами последних лет, нашедшими отражение в сборнике, явились исследования, целью которых было внедрить в метрологическую практику определение единицы длины — метра в длинах волн криптона-86. Разработаны и изготовлены установка для измерения длин волн монохроматических источников света и интерферометр для измерения длины вторичных штриховых эталонов до 1 м, которые будут служить в качестве эталонных для воспроизведения метра. Эти работы завершают наиболее важный этап развития линейных измерений за пятьдесят лет советской метрологии.

В отдельных статьях даны результаты исследований монохроматических источников света, применяемых для интерференционных измерений. Несомненно, большой интерес для читателя представляют и исследования по применению излучений лазеров для линейных измерений, ибо они открывают новые пути дальнейшего повышения точности эталонов и расширения пределов измерений длины.

Несколько статей посвящено работам по созданию новых средств передачи размера единицы длины от эталонов образцовым мерам. Только при наличии таких средств достигнутое уже повышение точности эталонов сделает возможным повышение точности линейных измерений в промышленности.

В сборнике также изложены результаты работ по созданию средств измерений больших длин в машиностроении; впервые поставлен вопрос о проверке свето- и радиодальномеров.

Ряд статей посвящен проблемам создания точных приборов для линейных измерений, применения методов математического моделирования, методам поверки в динамическом режиме приборов для контроля линейных размеров и др.

Требования к точности линейных измерений в промышленности в настоящее время значительно возросли, поэтому ознакомление с результатами метрологических работ в этой области будет полезно для широкого круга читателей.

Редактор

М. Л. БРЖЕЗИНСКИЙ, Т. В. КОЛЫМАГИНА,
Г. М. МАРГОЛИНА, Г. В. СИМАХИНА

ВНИИМ

УДК 531.711 : 531.715.1

ЭТАЛОННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В связи с переходом на новое определение единицы длины во ВНИИМ создана эталонная интерференционная установка для воспроизведения метра в длинах световых волн первичного эталонного излучения ^{86}Kr . Она состоит из интерферометра, монохроматических источников света, фотоэлектрического микроскопа, рефрактометра для определения показателя преломления воздуха, прецизионной аппаратуры для измерения температуры и других вспомогательных измерительных средств.

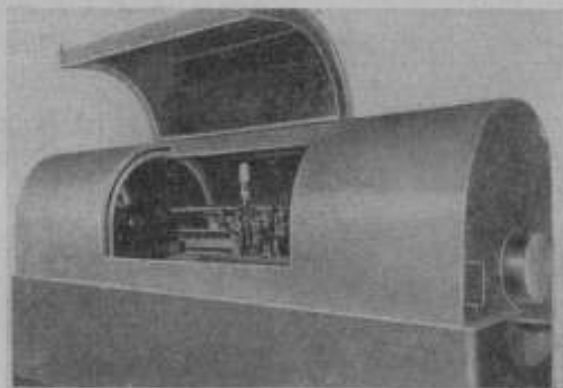


Рис. 1. Общий вид эталонного компаратора в термозащитном футляре.

Установка находится в изолированном полуподвальном помещении с капитальными стенами толщиной 0,7 м. В окружающих коридорах и помещениях температура изменяется в течение года в пределах 17—20° С. Интерферометр установлен в центре термостата на массивном фундаменте, изолированном от пола, и для тепловой и акустической изоляции заключен в кожух с двойными стенками (рис. 1).

Монохроматические источники света, пульт наблюдения и управления (рис. 2) и потенциометр расположены за теплоизоляционной перегородкой. Форвакуумный и диффузионный насосы также находятся вне термостатной камеры, за капитальной стеной. Наблюдение и управление процессом измерения осуществляются с одного пульта.

Так как температура воздуха в соседних помещениях в любое время года не превышает 20°C , то в термостате предусмотрен только подогрев воздуха до 20°C . Маломощные электроды с вентиляторами подогревают и перемешивают воздух, автоматически поддерживая требуемый температурный режим. Приведенные в табл. 1 результаты наблюдения за темпера-

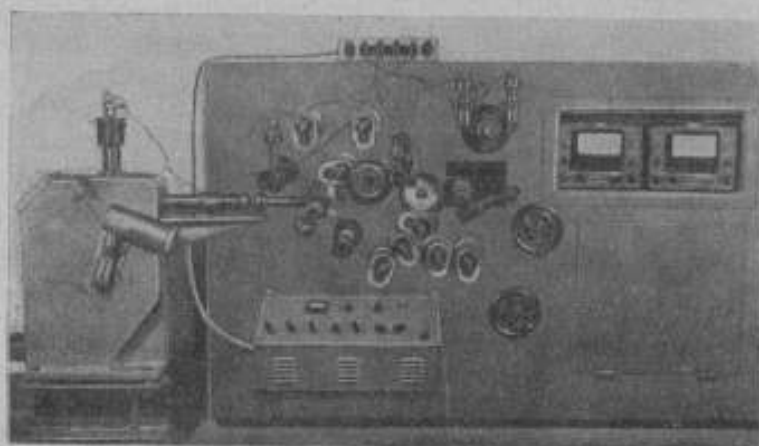


Рис. 2. Пульт управления и наблюдения.

Результаты наблюдения за температурой воздуха в термостате

Таблица 1

Дата наблюдения 1965 г.	Показания термометров $^{\circ}\text{C}$			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
25/VI	20,000	20,002	19,991	19,994
26	19,998	20,000	987	993
27	996	19,994	985	993
28	996	996	985	989
29	996	995	984	990
30	998	996	990	20,002
5	985	986	993	19,994
6/VII	986	987	990	990
7	987	988	991	986
8	983	987	992	991
9	984	984	983	989
10	997	997	985	998
12	993	991	988	991
13	992	993	988	990
14	995	995	989	993
15	995	996	993	995
17	995	995	993	990
19	19,995	19,994	19,990	19,992

* Термометры с ценой деления $0,01^{\circ}\text{C}$ подвешивают в центральной зоне термостата на одном уровне с интерферометром

турой воздуха в термостате свидетельствуют о достаточно высокой стабильности и равномерности распределения температуры в течение длительного периода времени. Температура меры и воздуха внутри футляра интерферометра определена платиновым термометром сопротивления и дифференциальными термопарами (табл. 2 и 3).

Из табл. 1—3 видно, что наиболее стабильный температурный режим в термостате наблюдается в летние месяцы, когда выключена отопительная система.

Таблица 2

Результаты измерения температуры воздуха внутри футляра интерферометра

Дата и время измерения, 1966 г.	Температура термометра сопротивления, °С	Температура воздуха в отдельных точках, внутри футляра, °С		
		1	2	3
31/X				
10.00	20,071	20,079	20,081	20,090
14.40	20,066	20,083	20,087	20,091
1/XI				
10.00	20,036	20,112	20,113	20,117
16.30	20,038	20,068	20,066	20,061
2/XI				
10.00	20,009	20,029	20,032	20,031
3/XI				
11.00	19,994	20,011	20,007	20,010
16.10	19,989	19,990	19,992	19,993
11/XI				
10.00	19,889	20,033	20,026	20,023
14/XI				
10.00	19,825	19,911	19,908	19,901
16.00	19,828	19,840	19,843	19,845

Оптическая схема эталонной интерференционной установки представлена на рис. 3. Свет от монохроматического источника лампы с криптоном-86 через монохроматор 1 направляется параллельным пучком на разделяющую и компенсационную пластины 8. Для исключения влияния паразитных отражений от поверхностей стекла при наблюдении в поляризованном свете разделяющая пластина установлена под углом Брюстера к падающему световому потоку. Отраженный от плоскости разделяющей пластины пучок света делится на два, один из которых зеркало 7 направляет на подвижное зеркало 15, жестко связанное с фотоэлектрическим микроскопом 16; другой же, отразившись от зеркала 9, падает на относительное зеркало 11, укрепленное на подвижной каретке. Затем эти пучки света совершают обратный путь через пластину 8 и зеркалом 10 направляются в наблюдательную систему. В результате интерференции этих пучков можно наблюдать в плоскости зеркала интерференционные полосы равной толщины.

Результаты наблюдения за температурой штрихового рабочего эталона — метра № 567

Дата и время измерения, 1966 г.	Температура термометра сопротивления, °С	Температура в различных точках меры, °С		
		1	2	3
19/V				
10.00	20,014	20,026	20,030	20,024
16.00	20,027	20,024	20,030	20,025
20/V				
11.30	20,040	20,041	20,048	20,041
21/V				
12.15	20,052	20,054	20,061	20,053
23/V	20,074	20,073	20,080	20,075
25/V				
11.20	20,075	20,075	20,075	20,074
26/V				
10.10	20,065	20,064	20,066	20,064
16.30	20,044	20,044	20,044	20,042
31/V				
14.40	20,096	20,092	20,095	20,094
13/IX				
10.00	19,875	19,873	19,877	19,871
14.00	19,875	19,889	19,892	19,891
16.00	19,881	19,901	19,901	19,903
17/IX				
11.00	19,928	19,928	19,928	19,927
14.00	19,952	19,960	19,962	19,962
17.00	19,960	19,955	19,958	19,958

Для измерения малых разностей и дробных частей порядка интерференции служит высокочувствительное интерференционное устройство, которое состоит из разделяющей пластины 13, зеркал 12 и 14. Последнее укреплено на одной из торцовых плоскостей стола 17, на который помещают меру. Стол может в небольших пределах перемещаться в направлении оси меры.

Интервал штриховой меры, подлежащий измерению, фиксируют по микроскопу наведением на начальный и конечный штрихи меры, а его значение определяют в длинах световых волн интерференционным методом. Наблюдаемый порядок интерференции при положении микроскопа 16 на начальном штрихе меры будет $N_1 + \epsilon_1$ (N_1 — целое число, ϵ_1 — дробная часть порядка интерференции), а при положении на конечном штрихе $N_2 + \epsilon_2$. Расстояние L между штрихами, выраженное в длинах световых

волн применяемого излучения, находят из уравнения

$$L = [(N_2 + \epsilon_2) - (N_1 + \epsilon_1)] \frac{\lambda}{2}.$$

Таким образом, рассмотренная оптическая схема представляет собой сочетание продольного компаратора с двухлучевым интерферометром.

Для коррекции положения фотоэлектрического микроскопа с подвижным зеркалом предусмотрена отдельная интерференционная система (рис. 4). На тубусе микроскопа 6 кроме основного зеркала 5 укреплены два небольших зеркала 3 и 4, расположенных приблизительно симметрично относительно оси, вокруг которой возможны наклоны тубуса микроскопа в вертикальной плоскости. На эти зеркала через кубик 1 и разделяющую пластину 2 направлены два пучка белого света, которые будут интерферировать при нулевой разности хода. Юстировкой микроскопа добиваются перпендикулярности его к оси относительно плоскости стола, где устанавливают измеряемую штриховую меру. По черной ахроматической полосе в поле зрительной трубы 7 фиксируют положение интерференционной картины. Если при движении каретки с микроскопом вдоль направляющей балки станины тубус микроскопа с зеркалами наклонится, то изменится разность хода в ветвях интерферометра и черная полоса сместится. От подвижной каретки к пульту управления выведены рычаги, с помощью которых, незначительно наклоняя микроскоп с зеркалами, интерференционную картину приводят в исходное положение и восстанавливают перпендикулярность оси микроскопа.

Так как длину эталонов измеряют в воздухе, то для определения длины волн ^{86}Kr , с помощью которых производят измерения, необходимо знать показатель преломления воздуха. С этой целью в интерференционную установку встроен рефрактометр, его оптическая схема показана на рис. 3. Более подробно интерференционная установка описана в работах [1, 2].

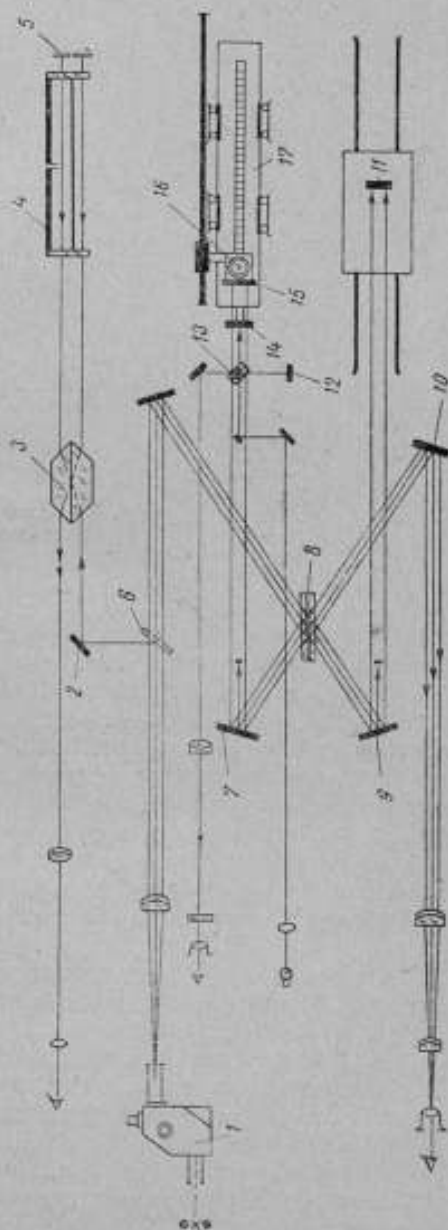


Рис. 3. Оптическая схема эталонной интерференционной установки.

Монохроматические источники света. Для воспроизведения первичной и вторичных эталонных длин волн применяют одноизотопные источники света ^{86}Kr , ^{198}Hg и ^{113}Cd , выполненные в соответствии с требованиями Международного бюро мер и весов (МБМВ). По новому определению значение метра установлено в длинах волн оранжевой линии в пустоте излучения, соответствующего переходам между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома ^{86}Kr [3]. В качестве источника света МБМВ рекомендует применять лампу Энгельгарда. Однако конструкция этой лампы имеет недостатки: вследствие того что свет, выходящий из капилляра, должен пройти через толщу жидкого или твердого азота, где он частично поглощается, снижается освещен-

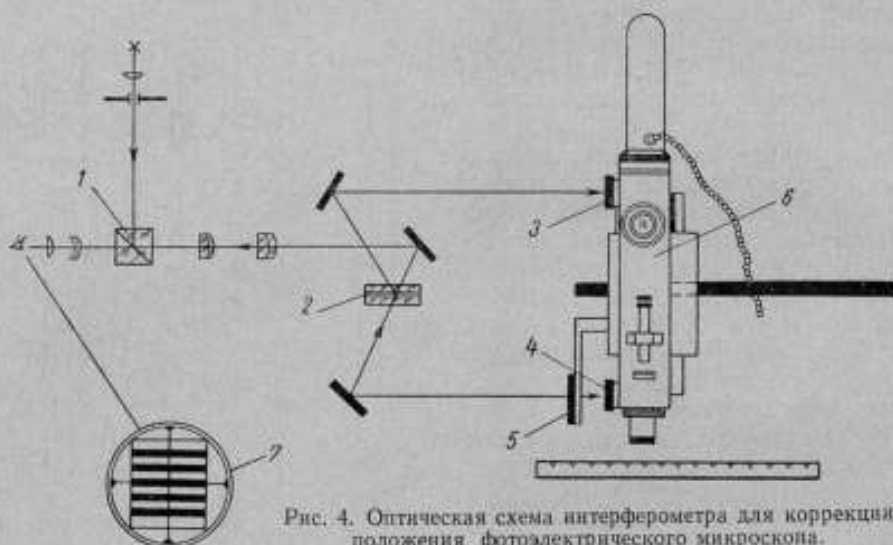


Рис. 4. Оптическая схема интерферометра для коррекции положения фотоэлектрического микроскопа.

ность поля интерферометра; кроме того, цилиндрические стенки сосуда Дьюара искажают изображение светящегося отверстия капилляра.

Эти недостатки устранены в лампе ВНИИМ (рис. 5), которая была использована при воспроизведении метра. Разрядная трубка 3 лампы имеет форму цилиндра длиной около 200 мм и диаметром 20 мм. В верхней его части помещен катод, состоящий из спирали 1 и экрана 2; в нижней части цилиндр сужается до требуемых размеров капилляра 4 и заканчивается расширением, где находится холодный анод 5 цилиндрической формы. Разрядная трубка опирается на выступ 6 в дне сосуда Дьюара. Торцовые плоскости трубки и выступа отполированы и служат окном, через которое свет из капилляра через конденсор 7 и призму 8 направляется на щель интерферометра.

При использовании лампы сосуд Дьюара наполняют чистым жидким азотом и форвакуумным насосом откачивают пары кипящего азота до понижения температуры, соответствующей тройной точке азота 63°K . Лампа снабжена газовым термометром.

Длины волн других спектральных линий — лампы с ^{86}Kr и безэлектродной с ^{198}Hg — применяют в качестве вторичных эталонов.

Рефрактометр. Как известно, метр определяют в длинах световых волн атомного излучения в вакууме. При измерении длин штриховых или концевых эталонов последние сравнивают с длиной волны λ_a в воздухе интерференционным методом. Величина λ_a в воздухе связана с длиной волны λ_0

в вакууме зависимостью $\frac{\lambda_0}{\lambda_a} = n$, откуда

$$\lambda_a = \frac{\lambda_0}{n}. \quad (1)$$

Здесь n — показатель преломления воздуха, по которому определяют действительное значение λ_a .

Относительная погрешность воспроизведения длины первичной эталонной волны в вакууме составляет $1 \cdot 10^{-8}$ [5]. Чтобы обеспечить требуемую точность измерения длин эталонов в воздухе в длинах световых волн λ_a , показатель преломления воздуха необходимо знать с погрешностью того же порядка.

Значения длин волн в воздухе, рассчитанные по дисперсионной формуле Сирса—Барелла, исходя из известных значений длин волн в вакууме, вносят в результат измерения погрешность, большую $5 \cdot 10^{-8}$. Для уменьшения этой погрешности необходимо, чтобы все величины, входящие в расчетные формулы, были измерены с высокой точностью и состав воздуха, в котором происходили измерения, не отличался от нормального [4]. Последнее условие практически невыполнимо, так как измерения производят в термостате, где состав воздуха может отличаться от нормального. Кроме того, интерферометр заключен в защитный футляр с малым объемом воздуха; наличие же смазки, краски и других агентов в ограниченном воздушном пространстве также может изменить состав воздуха, а следовательно, и показатель преломления.

Для получения надежных и точных результатов необходимо определять рефрактометром показатель преломления воздуха, в котором распространяется излучение. В табл. 4 приведены для сравнения значения $n_{\text{изм}}$, полученные экспериментально, и $n_{\text{расч}}$, рассчитанные по дисперсионной формуле с учетом давления, температуры и влажности лабораторного воздуха, которые определяли одновременно с измерениями на рефрактометре.

Исследования показали, что измеренные значения показателя преломления воздуха всегда больше вычисленных по дисперсионной формуле. Расхождения между ними составляют в среднем $4 \cdot 10^{-7}$. Такая разница объясняется наличием в составе лабораторного воздуха большего процентного содержания CO_2 и других компонентов, чем это предусмотрено для нормального состава воздуха, а также приближенностью дисперсионной формулы.

Показатель преломления определяют с помощью двухлучевого интерферометра методом сравнения оптических разностей хода в воздухе и вакууме. Если один из пучков проходит путь в вакууме, а другой — путь такой же длины в воздухе, то число длин полуволи (порядков интерференции), приходящихся на длину пути (длину вакуумной камеры l), изменяется от $2l/\lambda_a$ до $2l/\lambda_0$ и разность порядков интерферирующих пучков будет

$$\Delta K = \left(\frac{2l}{\lambda_a} - \frac{2l}{\lambda_0} \right).$$

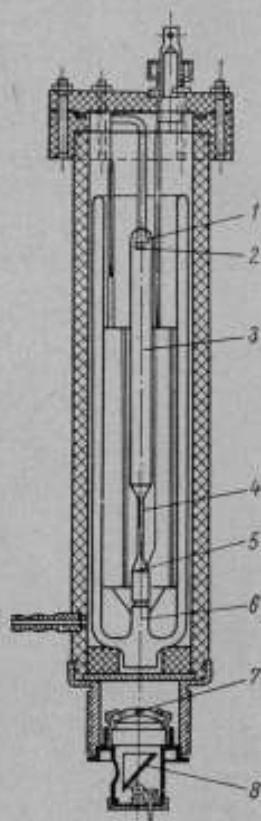


Рис. 5. Криптоновая лампа ВНИИМ.

Таблица 4

Результаты определения показателя преломления воздуха

Дата наблюдения	$n_{\text{изм}}$	Поправка с учетом $n_{\text{изм}}$	$n_{\text{расч}}$	Поправка с учетом $n_{\text{расч}}$
12/VII	1,00027225	+0,585	1,00027173	+0,839
13	1,00027345	-0,02	1,00027302	+0,235
14	1,00027534	-0,967	1,00027475	-0,650
17	1,00027597	-1,278	1,00027580	-1,194
17	1,00027662	-1,602	1,00027614	-1,348
18	1,00027750	-2,043	1,00027696	-1,789
18	1,00027747	-2,031	1,00027696	-1,789
19	1,00027730	-1,945	1,00027669	-1,640
20	1,00027435	-0,468	1,00027423	-0,407
21	1,00027261	+0,401	1,00027253	+0,442
21	1,00027264	+0,386	1,00027253	+0,442
24	1,00027375	-0,171	1,00027313	+0,134

Подставив в эту формулу значение λ_0 из формулы (1), получим

$$\Delta K = \frac{2l}{\lambda_0} (n - 1). \quad (2)$$

Следовательно,

$$n - 1 = \frac{\Delta K \lambda_0}{2l}. \quad (3)$$

Рассмотрим оптическую схему рефрактометра (рис. 3). Пучок монохроматического излучения, который направляется в интерферометр, переключается зеркалом 6 и, отразившись от вспомогательного зеркала 2, падает на разделительный блок 3. Разделенные пучки света идут параллельно друг другу; один из них поступает в вакуумную камеру 4, а другой проходит в воздухе путь, ограниченный теми же плоскопараллельными прозрачными пластинами, что и вакуумная камера. За камерой установлены два зеркала 5 в регулируемых оправах. Одно из зеркал перемещается в направлении пучка, а второе наклоняется в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Это дает возможность легко изменять наблюдаемую интерференционную картину по ширине и наклону полос.

Пройдя через камеру 4 и воздушное пространство и отразившись от зеркал 5, пучки будут интерферировать. Когда камера заполнена воздухом, в поле зрительной трубы наблюдают интерференционные полосы равной толщины. При откачке воздуха изменяется разность хода, и полосы начинают перемещаться; по достижении степени разрежения порядка $3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. движение прекращается, и интерференционная картина стабилизируется. По смещению интерференционных полос в вакуумной камере относительно полос в воздухе определяют разность порядков интерференции ΔK .

Вакуумная камера изготовлена из инструментальной стали марки ХВГ в виде концевой меры с каналом для получения вакуума. Закаленные торцовые плоскости меры доведены до высокой степени плоскостности и параллельности. Плоскопараллельные пластины толщиной 16 мм, изго-

товленные из однородного оптического кварца, притерты к торцовым плоскостям меры и по краям приклеены эпоксидной смолой. Канал для вакуума проходит в центре опорных плоскостей, к которым притерты пластины, и при откачке воздуха изменение давления не нарушает их параллельности и плоскостности.

В результате исследований была уменьшена систематическая погрешность определения показателя преломления воздуха рефрактометром. Для исключения систематической погрешности, вызванной недостаточной юстировкой разделительного блока рефрактометра, добивались равенства оптических путей интерферирующих пучков в белом свете, перемещая относительно друг друга обе половины призмы. Остаточную погрешность юстировки рефрактометра и изготовления вакуумной камеры определяли следующим образом.

Меру с вакуумной камерой испытывали в двух положениях так, чтобы каждый из пучков света сначала проходил в воздухе, а затем в вакууме, для чего поворачивали вокруг продольной оси на 180° либо камеру, либо разделяющий блок. На эталонной интерференционной установке предусмотрена возможность поворота разделяющей призмы. Если порядок интерференции при помещении вакуумной камеры в первый пучок будет $K + \delta K$, а во второй $K - \delta K$, то разность отсчетов даст постоянную поправку рефрактометра $2\delta K$. При измерении показателя преломления после откачки воздуха из камеры порядок интерференции изменится на ΔK (2). Когда камера расположена в первом пучке, наблюдаемый порядок интерференции будет $K + \delta K + \Delta K$, а когда во втором пучке $K - \delta K - \Delta K$. Разность отсчетов равна $2\delta K + 2\Delta K$.

Так как постоянная поправка δK и длина камеры l известны, определим значение ΔK , содержащее целое число и дробную часть порядка интерференции.

Наблюдая интерференционную картину полос равной толщины, определяем только дробные части порядка интерференции e для нескольких длин волн. Затем методом совпадения дробных частей находим целое число порядков интерференции. При измерении показателя преломления лабораторного воздуха целое число можно найти по дисперсионной формуле и формуле (3), если предварительно измерить давление, температуру и влажность воздуха.

Целое число порядков интерференции можно определить также и счетом интерференционных полос.

При определении показателя преломления лабораторного воздуха использовали вакуумные камеры номинальной длины 100, 200, 500 и 1000 мм. В результате этих исследований было установлено, что нет необходимости применять камеру 1000 мм; достаточную точность обеспечивает камера 500 мм.

Как уже говорилось выше, показатель преломления воздуха должен быть определен с погрешностью того же порядка, что и погрешность воспроизведения эталонной длины волны. Рассмотрим отдельные составляющие погрешности определения показателя преломления.

В формулу (3) входят независимые переменные, от погрешности которых зависит погрешность вычисления n . При определении разности порядков интерференции ΔK возникает погрешность отсчета дробных частей, которая составляет $\delta e = 0,05$ полосы. Погрешность воспроизведения длины волны в вакууме $\delta \lambda_0 = \pm 1 \cdot 10^{-8}$.

Длина камеры 500 мм измерена интерференционным методом, как концевая мера 1-го разряда с погрешностью $\delta l = \pm 0,1$ мкм.

Показатель преломления является функцией нескольких переменных $n = f(e, \lambda_0, l)$, поэтому его дисперсию определяют суммированием

дисперсий независимых переменных:

$$D(n) = \left(\frac{\partial n}{\partial \epsilon}\right)^2 D(\epsilon) + \left(\frac{\partial n}{\partial \lambda_0}\right)^2 D(\lambda_0) + \left(\frac{\partial n}{\partial l}\right)^2 D(l). \quad (4)$$

Подставив числовые значения дисперсий этих переменных $D(\epsilon) = 25 \cdot 10^{-4}$; $D(\lambda_0) = 1 \cdot 10^{-16}$; $D(l) = 1 \cdot 10^{-2}$, получим $D(n) = 9 \cdot 10^{-16}$. Отсюда средняя квадратическая погрешность определения показателя преломления воздуха $\delta n = 3 \cdot 10^{-8}$.

Аппаратура для измерения температуры мер. Требования к точности измерения температуры мер определяются допустимой погрешностью воспроизведения единицы длины. Чтобы обеспечить измерение метра с отно-



Рис. 6. Общий вид термометрической установки.

сительной погрешностью результата $2 \div 3 \cdot 10^{-4}$, необходимо знать температуру меры с погрешностью $0,002-0,003$ град, для чего следует измерить абсолютное значение температуры холодных спаев термопар, а также разность температур холодных и рабочих спаев. При исследовании рабочие спаи приводили в контакт с поверхностью меры. Температуру холодных спаев измеряли платиновым термометром сопротивления.

Для измерения сопротивления термометра с требуемой точностью были испытаны три термометрические установки: мост типа УМК-2, мост Мюллера фирмы «Тинсли» и отечественный потенциометр типа Р308 (рис. 6). Наиболее приемлемым по точности и параметрам оказался потенциометр класса 0,002.

Разность температур спаев измеряли дифференциальными термопарами, у которых предварительно проверяли качество термических контактов с поверхностью меры и с платиновым термометром.

На рис. 7 показана схема соединения термопар 1, термометра сопротивления 2 и потенциометра 5 типа Р308 с фотоусилителем 6 и дополнительной электрической цепью (переключатель 4, образцовая катушка 3 для измерения сопротивлений).

Медь-константановые термомпары 1 изготовлены с учетом повышенных требований. Вместо обычной пайки оловом проводников к термоконтактной медной пластинке в этом случае применяли электросварку, благодаря чему удалось избавиться от третьего компонента — олова. В качестве коммутирующих устройств для раздельного измерения т. э. д. с. использовали безтермоточные переключатели 7 и 8, у которых предварительно проверили наличие контактных паразитных т. э. д. с.; последние оказались на порядок меньше измеряемой т. э. д. с. Соединение термомпар с переключателями и гальванометром выполнено красномедными проводами. Платиновый термометр № 1 с номинальным значением сопротивления 10 ом был

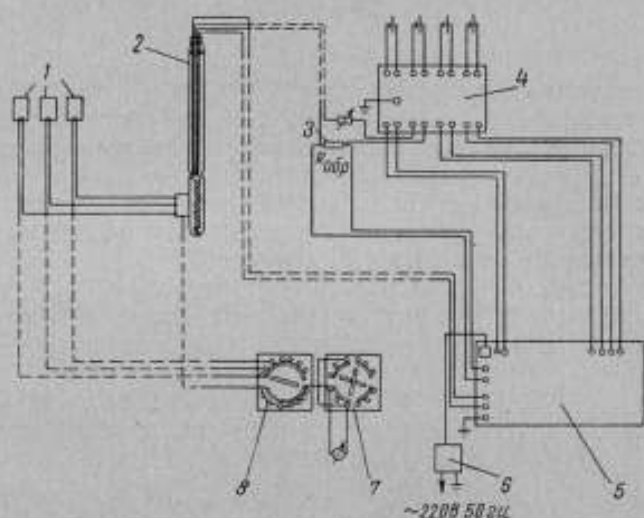


Рис. 7. Принципиальная схема термометрической установки для измерения температуры.

поверен с наивысшей точностью в термометрической лаборатории ВНИИМ в трех реперных точках: тройной точке воды, которая соответствует температуре $0,0100^\circ\text{C}$, точках кипения воды 100°C и затвердевания цинка $419,505^\circ\text{C}$.

Потенциометр 6 снабжен системой подстройки, позволяющей при эксплуатации значительно уменьшить его погрешность по сравнению с допустимой для класса 0,002. В данном случае погрешность измерения сопротивления составляла $3 \div 4 \cdot 10^{-5}$ ом.

Температуру платинового термометра $t_{x,c}$ определяли по его сопротивлению R_t :

$$R_t = \Psi_{tp}(t) R_{tp} + \Psi_{100}(t) R_{100} + \Psi_{Zn}(t) R_{Zn}, \quad (5)$$

где t — температура, близкая к измеряемой, разность между ними Δt не должна превышать $0,5^\circ\text{C}$;

$\Psi_{tp}(t)$, $\Psi_{100}(t)$, $\Psi_{Zn}(t)$ — соответственно функции влияния тройной точки воды, точек кипения воды и затвердевания цинка.

Функции влияния находили по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{tp}(t) &= \frac{(t-100)(t-419,505)}{(0,01-100)(0,01-419,505)}; \\ \Psi_{100}(t) &= \frac{(t-419,505)(t-0,01)}{(100-419,505)(100-0,01)}; \\ \Psi_{Zn}(t) &= \frac{(t-0,01)(t-100)}{(419,505-0,01)(419,505-100)}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Значение $t_{z.c}$ вычисляли из уравнения

$$t_{z.c} = t \pm \Delta t,$$

где

$$\Delta t = \frac{\Delta R}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_t};$$

ΔR — разность между рассчитанным по формуле (5) сопротивлением R_t и измеренным R_x ;

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_t = \varphi'_{Tp}(t) R_{Tp} + \varphi'_{100}(t) R_{100} + \varphi'_{Zn}(t) R_{Zn}. \quad (7)$$

Производные функций влияния $\varphi'_{Tp}(t)$, $\varphi'_{100}(t)$, $\varphi'_{Zn}(t)$ были вычислены в термометрической лаборатории ВНИИМ. Для ускорения расчетов во время измерений пользовались предварительно составленной таблицей значений температуры платинового термометра в зависимости от его сопротивления.

Погрешность измерения температуры платинового термометра δt_1 зависит от погрешностей измерения сопротивления δR_t и аттестации термометра в реперных точках δR_{Tp} , δR_{100} , δR_{Zn} [6]:

$$\delta t_1 = \frac{1}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_t} \delta R_t - \frac{\varphi_{Tp}(t)}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_t} \delta R_{Tp} - \frac{\varphi_{100}(t)}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_t} \delta R_{100} - \frac{\varphi_{Zn}(t)}{\left(\frac{dR}{dt}\right)_t} \delta R_{Zn}. \quad (8)$$

На данном потенциометре $\delta R_t = 4 \cdot 10^{-5}$ ом. Допустимые погрешности аттестации платинового термометра были установлены в термометрической лаборатории: для точки кипения и тройной точки воды $1 \cdot 10^{-5}$ ом и для точки затвердевания цинка $2 \div 3 \cdot 10^{-5}$ ом. Таким образом,

$$\delta t_1 = 0,0012 \text{ град.}$$

Погрешность измерения температуры меры δt определяется погрешностью измерения температуры платинового термометра δt_1 и погрешностью, вносимой термометрами. Погрешность термометров определяется в свою очередь погрешностями аттестации ртутных термометров, используемых при градуировке термометров, отсчета по шкале гальванометра и др. Погрешность аттестации ртутных термометров с ценой деления $0,01^\circ \text{C}$ приняли равной $\delta t_2 = 0,001 \text{ град}$, а средняя квадратическая погрешность цены деления $0,0015 \text{ град/мм}$ термометры составляла $0,00004 \text{ град/мм}$.

В процессе измерения температуры термометра сопротивления и меры, как правило, очень близки, и показания по шкале гальванометра не превышают ± 50 делений. Погрешность из-за неточности определения цены деления термометры $\delta t_3 = \pm 0,002 \text{ град/мм}$. Погрешность отсчета по шкале гальванометра порядка 0,2 деления, следовательно, при цене деления шкалы $0,0015 \text{ град/мм}$ она будет мала.

Суммируя квадратично составляющие погрешности, находим погрешность измерения температуры меры:

$$\delta t = \sqrt{(\delta t_1)^2 + (\delta t_2)^2 + (\delta t_3)^2} \approx 0,003 \text{ град.} \quad (9)$$

Для получения более достоверных результатов авторы стремились свести до минимума наличие температурных градиентов меры, обеспечивая устойчивый температурный режим в термостате и внутри футляра интер-

ферометра (табл. 1 и 2). При этих условиях и длительной выдержке мера принимала температуру окружающей среды и наличие температурного градиента по длине не превышало тысячных долей градуса (табл. 3).

Результаты воспроизведения метра. Воспроизведение единицы длины в длинах световых волн и абсолютные измерения штриховых рабочих эталонов длины осуществляются с применением комплекса измерительных средств, в силу чего искомую величину получают как совокупный результат расчета и эксперимента. Поэтому метрологическая оценка интерференционной установки может быть дана только на основании анализа метода и оценки точности всех вспомогательных средств, участвующих в процессе измерения. Эта задача сводится к определению суммарной погрешности результата измерений по отдельным составляющим погрешностям.

В метрологической практике суммарную погрешность определяют двумя методами: 1) многократными измерениями одной и той же величины и 2) посредством анализа отдельных составляющих погрешностей. В первом случае по рассеянию ряда измерений находят среднюю квадратическую или предельную погрешность как совокупность отдельных случайных погрешностей, варьировавших в процессе повторных независимых измерений.

В случае измерений на сложной установке вспомогательные приборы будут иметь собственные как случайные, так и систематические погрешности (ошибки градуировки, погрешности аттестации и др.).

Второй метод оценки суммарной погрешности на основании анализа отдельных составляющих дает возможность рассмотреть все сопутствующие измерению погрешности. Эти два метода могут и должны дополнять друг друга, так как первый выявляет скрытые погрешности, которые не были учтены при анализе отдельных составляющих погрешностей.

Варьирующие погрешности были выявлены при измерении платино-иридиевого метра № 11 в длинах волн ^{85}Kr (табл. 5). На эталонной интерференционной установке проведены две серии по 12 измерений при двух положениях метра (AB и BA). Средняя квадратическая погрешность σ измерений составляла 0,05 мкм, а погрешность среднего арифметического $S = 0,02$ мкм.

Не имея возможности в данной статье остановиться на описании методов определения всех составляющих погрешностей, приведем конечные результаты исследования.

Суммируя квадратично отдельные составляющие погрешности, получим погрешность измерения длины

$$\sigma_l = \pm \sqrt{(\delta l_e)^2 + (\delta l_n)^2 + (\delta C_{2l})^2 + (\delta C_{2a})^2 + (\delta C_1)^2 + (\delta l_{\lambda_0})^2},$$

где δl_e и δl_n — погрешности измерения длины l , обусловленные погрешностями определения дробных частей порядков интерференции e и показателя преломления воздуха n ;

δC_{2l} и δC_{2a} — погрешности определения поправки C_2 для приведения измеряемой длины меры к 20°C , обусловленные погрешностями измерения температуры и принятого значения температурного коэффициента α меры;

δC_1 — погрешность поправки на размеры щели коллиматора;

δl_{λ_0} — погрешность определения длины l , обусловленная погрешностью принятых значений λ_0 .

Подставив в это уравнение числовые значения составляющих погрешностей, найденных экспериментально на эталонной установке и принятых на основании других метрологических работ, получим среднюю квадратическую погрешность $\sigma_l = 0,05$ мкм.

Степень влияния каждой составляющей погрешности на результат измерения различна. Значения погрешностей δl_e , δl_n , δC_{2l} при повторных

Таблица 5

Результаты измерений длины платино-иридиевого метра № 11 в длинах волн $^{88} \text{Kt}$

Номер измерения	Положение метра АВ		Положение метра ВА	
	поправка к номинальному значению, мкм	остаточная погрешность v_i , мкм	поправка к номинальному значению, мкм	остаточная погрешность v_i , мкм
1	+1,49	+0,10	+1,49	+0,04
2	+1,42	+0,03	+1,54	+0,09
3	+1,36	-0,03	+1,45	0,00
4	+1,36	-0,03	+1,45	0,00
5	+1,37	-0,02	+1,42	-0,03
6	+1,32	-0,07	+1,40	-0,05
7	+1,34	-0,05	+1,44	-0,01
8	+1,47	+0,08	+1,50	-0,05
9	+1,42	+0,03	+1,44	-0,01
10	+1,34	-0,05	+1,41	-0,04
11	+1,47	+0,08	+1,47	+0,02
12	+1,37	-0,02	+1,43	-0,02
Среднее	+1,39	+0,32 -0,30	+1,45	+0,20 -0,16

Примечание. Средняя квадратическая погрешность измерений $\sigma =$

$= \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{n-1}}$; погрешность среднего арифметического $S = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Для положения метра АВ $\sigma = 0,06$ мкм, $S = 0,02$ мкм а для положения ВА $\sigma = 0,04$ мкм, $S = 0,01$ мкм. измерениях будут варьировать, тогда как значения δC_{2a} , δC_1 и δl_{λ_0} остаются постоянными. Влияние последних на результат не может быть уменьшено при многократных измерениях, когда используются одни и те же мера, установка и длины волн. Учитывая это обстоятельство, погрешность среднего арифметического из k измерений найдем из уравнения

$$S = \sqrt{\frac{(\delta l_e)^2 + (\delta l_n)^2 + (\delta C_{21})^2}{k} + (\delta C_{2a})^2 + (\delta C_1)^2 + (\delta l_{\lambda_0})^2}.$$

Для $k = 12$ получим $S = 0,022$ мкм.

Значения погрешностей, установленных из опытных данных, хорошо согласуются с результатами анализа составляющих погрешностей. Это подтверждает правильность оценки отдельных составляющих погрешностей и достаточно полный их анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бржезинский М. Л. Интерференционные компараторы для измерения длины штриховых мер. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
2. Бржезинский М. Л., Зорин Д. И., Свердличенко В. Д. Фотометрический фотоэлектрический микроскоп. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
3. Proc.-Verb. des séances C. C. pour la définition du mètre sessions des 1953, 1957, 1962 ann.
4. Gerrien J. An air refractometer for interference length metrology. «Metrologia», 1965, v. 1, № 3.
5. Батарчукова Н. Р. Новое определение метра. М., Стандартгиз, 1964.
6. Пилипчук Б. И. Ошибки эталонирования платинового термометра сопротивления. «Труды ВНИИМ», вып. 4 (64), 1948.

Поступила в редакцию 17/II 1967 г.

СПЕКТРОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИН ВОЛН
И ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТУРОВ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ

«Световой» метр можно полагать воспроизведенным, если получен источник спектра изотопа криптона-86, удовлетворяющий международной спецификации и с изученным излучением, соответствующим переходу $2p_{10}-5d_5$. При изучении исследуются форма и симметрия контура линий излучения, полуширина контура, а также определяются зависимости длины волны от давления криптона в лампе, плотности тока и диаметра капилляра.

Считая доплеровское расширение линии симметричным и при температуре тройной точки азота не влияющим на точность воспроизведения максимума контура линий ($2p_{10}-5d_5$), о наличии дополнительных возмущений судят по отклонениям экспериментального контура от теоретического. Полуширина экспериментального контура не должна превышать полуширины теоретического более чем в 1,2 раза.

Для снятия регистрограммы контура линий необходимо иметь установку с приборами высокой разрешающей силы. В качестве такого прибора может быть использован эталон Фабри—Перо или интерферометр Майкельсона. Эта же установка необходима для получения упомянутых выше зависимостей длины волны от давлений криптона внутри капилляра, от плотности тока и от диаметра капилляра. С помощью полученных экстраполяционных кривых можно вычислить поправки для приведения длины волны к условиям, соответствующим нулевому давлению и нулевой плотности тока. Это позволяет применять лампу с криптоном-86 в условиях, значительно отличающихся от условий спецификации, что облегчает ее изготовление.

Экстраполяционные кривые снимают следующим образом. При заданных разности хода в эталоне Фабри—Перо и плотности тока в разряде определяют в интервале $53-67^\circ \text{K}$ дробные части порядка интерференции при разных температурах стенок капилляра лампы. Затем при 63°K и заданной разности хода световых пучков находят дробную часть порядка интерференции при плотностях тока $0,2-0,5 \text{ а/см}^2$ и, наконец, при фиксированных температуре и плотности тока исследуют лампы с различными капиллярами.

Во ВНИИМ еще в 1950 г. [1] для исследования излучения изотопов кадмия была собрана лабораторная установка с эталоном Фабри—Перо, призменным спектрографом и фотографической регистрацией интерференционной картины. В 1957 г. эту установку усовершенствовали и снабдили системой фотоэлектрической регистрации интерференционных колец рав-

ного наклона. Для измерения длин волн и полуширины спектральных линий при фотоэлектрической регистрации был разработан объективный метод отсчета дробных частей порядков интерференции.

С целью расширения предела исследований по спектру в ближние инфракрасную и ультрафиолетовую области, повышения светосилы установки, уменьшения влияния вибраций, а также усовершенствования узла сканирования интерференционной картины необходимо было создать стационарный фотоэлектрический спектрометр Фабри—Перо для исследования и воспроизведения

и нового эталона длины других спектральных работ. В настоящее время спектрометр Фабри—Перо широко применяют не только для измерения длин волн, но и для изотопного анализа [2]. Применение пьезосканирования вместо сканирования изменением давления позволит использовать установку для измерения длин волн в вакууме при фотоэлектрической регистрации.

Оптическая схема интерференционного спектрометра (рис. 1) состоит из четырех частей: осветительной и приемной систем, монохроматора и эталона Фабри—Перо. Осветительная система в свою очередь состоит из трех зеркал. Зеркало 4 расположено так, что позволяет освещать входную щель 6 монохроматора источниками 1, 2, 3, которые находятся на отдельном столе. Поворачивая зеркало 4 вокруг вертикальной оси, можно последовательно проецировать на входную щель спектрометра изображение любого из трех источников. Сферическое зеркало 5 ($r = 1418$ мм, $D = 90$ мм) служит для проецирования изображения источников света на входную щель 6 монохроматора. Для сокращения габаритов спектрометра в ход освещающего пучка введены два дополнительных плоских зеркала.

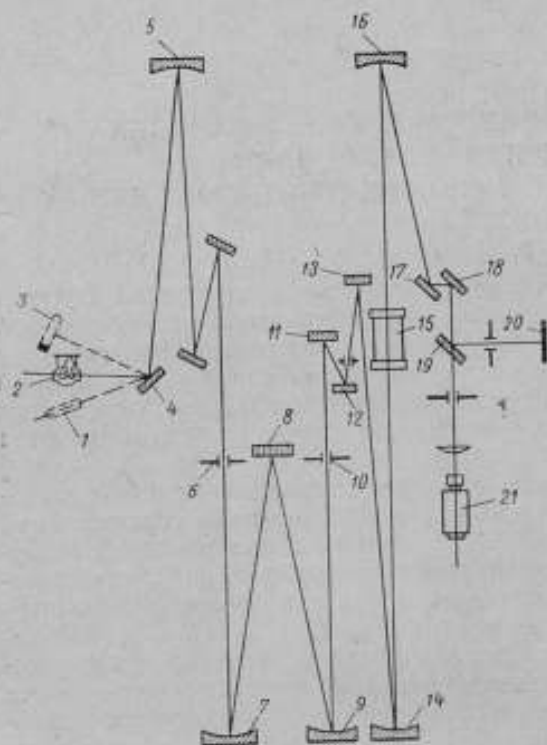


Рис. 1. Оптическая схема спектроинтерферометра.

Пройдя входную щель, пучок направляется на сферическое вогнутое зеркало 7. Так как щель находится в фокусе этого зеркала ($r = 2000$ мм), то на дифракционную решетку 8 падает параллельный пучок света. Отражаясь под углом дифракции, пучок далее попадает на второе сферическое зеркало 9 и собирается в выходной щели 10. Таким образом, монохроматор спектрометра построен по типу схемы Эберта—Фасти и отличается лишь тем, что в нем вместо одного сферического зеркала применены два с одинаковым радиусом кривизны. Замена одного сферического зеркала большого диаметра двумя меньшего диаметра значительно облегчило их изготовление. Итак, в плоскости входной щели 10 образуется изображение щели 6 в свете той длины волны, которая выделяется при соответствующем наклоне дифракционной решетки 8.

Далее свет направляется на два вспомогательных зеркала (сферическое 11 и плоское 12), которые дают изображение зрачка входа системы в промежуточной плоскости и одновременно проецируют изображение выходной щели 10 в плоскости эталона Фабри—Перо 15. Вспомогательное зеркало 13 направляет световой монохроматический пучок вертикально на вогнутое зеркало 14 ($r = 3600$ мм; $D = 80$ мм), посылающее параллельный пучок света на эталон Фабри—Перо.

От сферического зеркала 16 пучок света направляется в приемную систему, состоящую из трех элементов: фотоприемника (ФЭУ или фотодиод) 21, фотопластины 20 в кассете и окуляра для визуального наблюдения изображения входной щели или зрачка системы. Для передачи изображения этой щели служат плоские зеркала 17 и 18 и вспомогательное откидное 19, с помощью которого пучок света можно направить в окулярную часть или на фотоприемник 21.

Наклонная дифракционную решетку 8, выделяют то или иное монохроматическое излучение, падающее затем на эталон Фабри—Перо параллельным пучком. Плоскости зеркал эталона Фабри—Перо устанавливают перпендикулярно к этому световому пучку. Из картины интерференционных колец равного наклона, локализованных в бесконечности апертурной диафрагмой, размещенной между зеркалами 12 и 13, вырезают лишь центральное пятно.

С помощью интерференционного спектрометра можно изучать спектральные линии и участки спектров в различных диапазонах, так как применение зеркальной системы дает возможность работать в инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Переход от одной области к другой осуществляется сменой дифракционной решетки и приемника излучения, которая происходит без нарушения юстировки прибора и может быть выполнена весьма быстро.

Выбранная оптическая схема прибора позволила при значительной дисперсии и больших фокусных расстояниях осветительной и проектирующей систем сделать конструкцию весьма удобной и компактной.

Интерференционный спектрометр оформлен в виде вертикальной стойки с основной полкой, на которой укреплены главные узлы прибора. В нижней части рамы расположены детали монохроматора, а в верхней — осветительной и проектирующей систем зеркал (рис. 2). Вертикальное расположение прибора дает возможность значительно сократить его габариты (сечение прибора 320×580 мм и высота 2100 мм). Источники света находятся на изолированном столе, регистрирующая система, блоки питания источников и управление электрическими приводами монтированы на специальной стойке. Конструкция прибора позволяет весьма удобно юстировать его, налаживать и подготавливать к работе: менять дифракционную решетку, юстировать щели, устанавливать эталон Фабри—Перо, регулировать источники света, менять их и приемники излучения, наблюдать картину спектра и изменять режим регистрации (скорость сканирования спектра, скорость записи и пр.). Вся оптическая система полностью закрыта, и для доступа к ней служит открывающаяся дверца в верхней части передней панели прибора. Зеркало, на которое направляется свет от источников излучения, вынесено в левую сторону наружной части прибора и им легко регулировать смену направления света от различных источников. С помощью червячной передачи зеркало вращается вокруг вертикальной оси на $\pm 90^\circ$, охватывая угол обзора в 180° , что позволяет поместить на столе большое количество источников.

Различные спектральные линии, как уже было сказано, устанавливают поворотом дифракционной решетки вокруг горизонтальной оси с помощью механизма, изображенного на рис. 3. Дифракционная решетка 2 в оправе 3

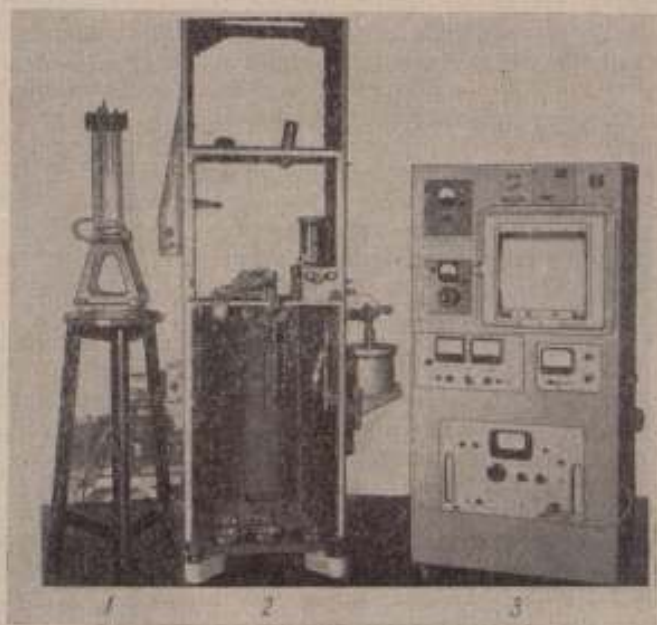


Рис. 2. Общий вид спектроинтерферометра.

1 — источник света с криптоном-86; 2 — стойка спектроинтерферометра; 3 — блок фотоэлектрической регистрации.

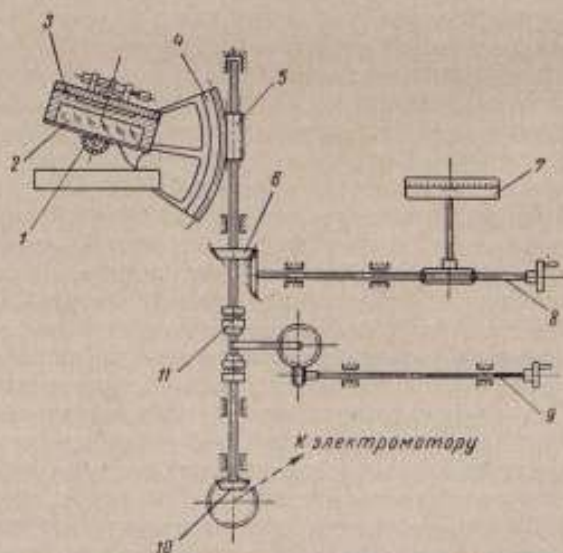


Рис. 3. Схема конструкции дифракционной решетки.

расположена на кронштейне. Ее можно поворачивать на шарикоподшипнике 1, связанном с червячным сектором 4, который в свою очередь связан с червяком 5. При вращении червяка дифракционная решетка может наклоняться на угол $\pm 45^\circ$. Это позволяет охватить дифракционными решетками в 300, 600 или 1200 *штр/мм* спектры различных порядков в диапазоне длин волн 3,5—0,2 *мкм*. Червяк 5 вращают ручным приводом с помощью конической пары 6 и рукоятки 8, связанной с барабанами 7, позволяющими отсчитывать положение дифракционной решетки в условных делениях. Кроме того, для сканирования спектра в регистрируемой области имеется механический привод, связанный с синхронным электромотором, приводящим при помощи конической пары 10 и муфты 11 в движение дифракционную решетку автоматически и непрерывно. Муфту можно включить или выключить рукояткой 9 в зависимости от того, устанавливают спектр вручную или он сканируется автоматически при регистрации.

Таким образом, конструкция прибора позволяет автоматически и непрерывно регистрировать спектр в желаемом диапазоне с различными скоростями, так как привод к электромотору имеет редуктор с переключением скоростей на три позиции (см. таблицу).



Рис. 4. Общий вид эталонов Фабри—Перо, входящих в комплект спектроинтерферометра.

1 — эталон с пьезокерамикой; 2 — регулируемый эталон с пятью сменными кварцевыми разделителями; 3 — трубчатый кварцевый.

Условное обозначение скорости на переключателе редуктора	Скорость сканирования спектра (<i>мм/сек</i>) при дифракционной решетке, <i>штр/мм</i>			
	600		1200	
	1-й порядок	2-й порядок	1-й порядок	2-й порядок
0,75	0,524	0,262	0,262	0,131
0,3	0,210	0,105	0,105	0,052
0,15	0,106	0,053	0,053	0,026

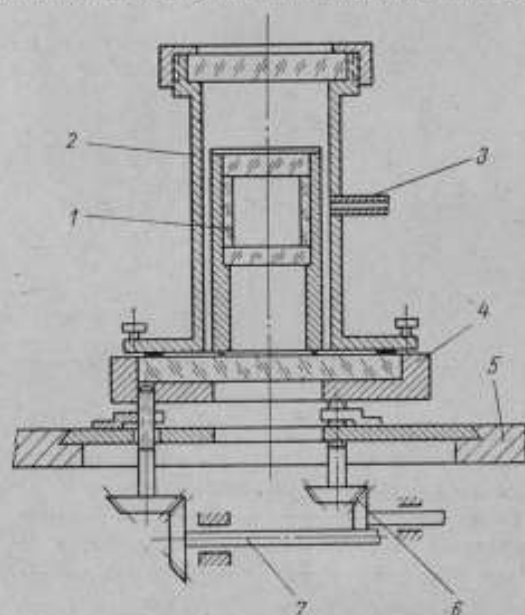
Из таблицы следует, что для записи спектра видимого диапазона при максимальной скорости требуется около 9 *мин*, а при минимальной — около 3 *ч*.

Ручной привод дифракционной решетки выведен на переднюю панель прибора, а механический — к редуктору через заднюю стенку прибора посредством карданного валика. Редуктор и синхронный мотор монтированы на отдельной тележке, полностью изолированной от прибора, что ликвидирует влияние на его работу вибраций привода.

С помощью эталонов Фабри—Перо (рис. 4), входящих в комплект прибора и размещенных в специальной камере, можно изучать сверхтонкую структуру спектров, точно измерить длины волн различных спектральных линий путем сравнения с первичной и вторичными эталонными длинами волн, смещение линий, вызываемое изменением условий возбуждения, произвести изотопический анализ путем сравнения интенсивности составляющих сверхтонкой структуры.

Схема расположения эталона Фабри—Перо с постоянным разделителем приведена на рис. 5. Эталон Фабри—Перо 1, регулируемый или с постоянным разделителем, расположен внутри камеры 2, из которой через штуцер 3 можно либо полностью эвакуировать воздух, либо менять его давление специальным пульсатором. При изменении давления воздуха внутри камеры меняется разность хода интерферирующих пучков в эталоне Фабри—Перо и происходит последовательная смена максимумов или минимумов интерференции.

Как известно, такой способ дает возможность регистрировать различные максимумы и минимумы интерференции и тем самым исследовать контуры спектральных линий с достаточно большой точностью.



Двумя винтами, связанными с приводами 6 и 7 (рис. 5) к рукояткам при помощи двух конических пар, камеру наклоняют в двух взаимноперпендикулярных направлениях так, чтобы плоскости зеркал эталона Фабри—Перо располагались перпендикулярно к освещающему параллельному пучку. Эталон Фабри—Перо при этом покоится на пластинке 4, опирающейся винтами на полку 5 спектрометра.

Представляет интерес конструкция узла щелей спектрометра, которые выполнены в виде единого блока таким образом, что одновременно одним и тем же приводом можно изменять ширину входной и выходной щелей от 0 до 3 мм с по-

Рис. 5. Схема конструкции узла эталона Фабри—Перо.

грешностью около 0,01 мм, не изменяя их взаимного расположения относительно освещающего и выходного пучков лучей. Каждая из щелей покоится на пластинах суппорта (рис. 6) так, что правые и левые щечки щелей, опирающиеся соответственно на опоры 3 и 6, 2 и 5, находятся на пластинах 1 и 4. Такая конструкция позволяет одновременно перемещать обе пары щечек, раскрывая или сужая входную и выходную щели на одну и ту же величину. Для этого пластины на направляющих все время подтянуты в одну сторону пружинами 7. С другой стороны эти пластины соединены общей плоской пружиной 11, перекинутой через блок 10, связанный с рычагом 9. При вращении ходового винта (не показанного на рисунке), рукоятка которого выведена на переднюю панель прибора, стальной конус на конце винта перемещается параллельно своей оси и заставляет поворачиваться рычаг 9 и привод валика. Натягивая и ослабляя пружину 11, валик перемещает пластины 1 и 4 в противоположных направлениях, меняя положение щечек щелей. Механизм щелей смонтирован на цилиндрическом корпусе 8, который крепят к оправе, находящейся в центре полки спектрометра против дифракционной решетки.

Излучение, поступающее в приемную часть спектрометра, падает на зеркало 1 (рис. 7), которое может поворачиваться и направлять свет либо на зеркало 2, либо непосредственно на плоскость фотопластинки 6.

Зеркало 2 в свою очередь направляет свет на фотоприемник 5 или с помощью полупрозрачного зеркала 4 — в окуляр 3. Это позволяет контролировать расположение щелей и заполнение их светом, юстировать источники света относительно входной щели и выверять эталон Фабри—Перо. Такая система дает возможность регистрировать излучение визу-

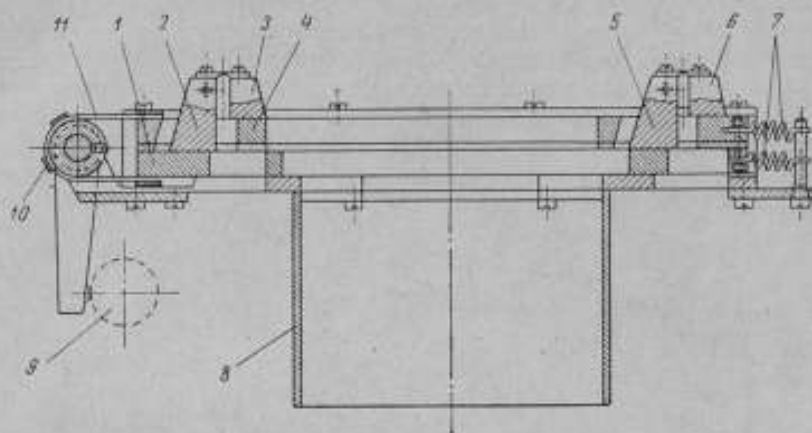


Рис. 6. Схема конструкции щелей спектроинтерферометра.

ально с помощью фотоприемника или фотографически. Для фотографической регистрации предусмотрена перемещающаяся кассета на 13 снимков для кадров размером 24×90 мм.

Система охлаждения (рис. 8) объема, где размещается фотокатод, уменьшает шумы, возникающие при регистрации слабых излучений с помощью ФЭУ или фотодиодов. Фотоумножитель 1 в оправе укреплен в центре цилиндрического блока 2 с тепловой изоляцией 3. В непосредственной близости с катодом фотоумножителя находится резервуар 4, имеющий два отверстия: одно из них связано с входной трубкой, по которой поступает холодный азот, а из другого азот выходит. Резервуар имеет в центре сквозной канал, в котором находится катод фотоумножителя. Для предохранения от запотевания ФЭУ в верхней части корпуса приемного узла предусмотрено кварцевое окно 5, закрывающее входное отверстие. Поступление холодного азота регулируют краном 6, соединяющим объем охлаждающего резервуара с сосудом Дьюара трубкой. Скорость поступления азота определяет температуру катода фотоприемника. Излишние пары азота выходят через специальный клапан, присоединенный к газопроводу.

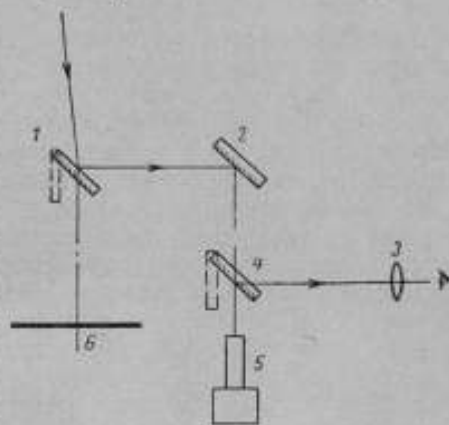


Рис. 7. Схема приемной части спектроинтерферометра.

Держатели фотоприемника сконструированы так, что последние можно сменять, не нарушая юстировки падающего пучка света. Это дает возможность применять для регистрации близкой инфракрасной, видимой

и ультрафиолетовой областей спектра ФЭУ-28, ФЭУ-51, ФЭУ-19М и ФЭУ-39А.

Регистрирующая система состоит из фотокомпенсационного микро-вольт-микроамперметра постоянного тока типа Ф-116 и электронного автоматического самопишущего потенциометра типа ЭПП-09. Для питания всех элементов регистрирующей системы и источников света, а также сканирования спектра и интерференционной картины блоки питания и рукоятки управления моторами монтированы на общей вертикальной стойке. Для питания типовых источников света (эталонной криптоновой лампы или других газоразрядных трубок с горячим катодом и кадмевых ламп) встроены два блока: один для питания цепи анода постоянным напряжением 1500 в и цепи катода переменным напряжением 6,3 в; другой — для газоразрядных ламп напряжением 220 в.

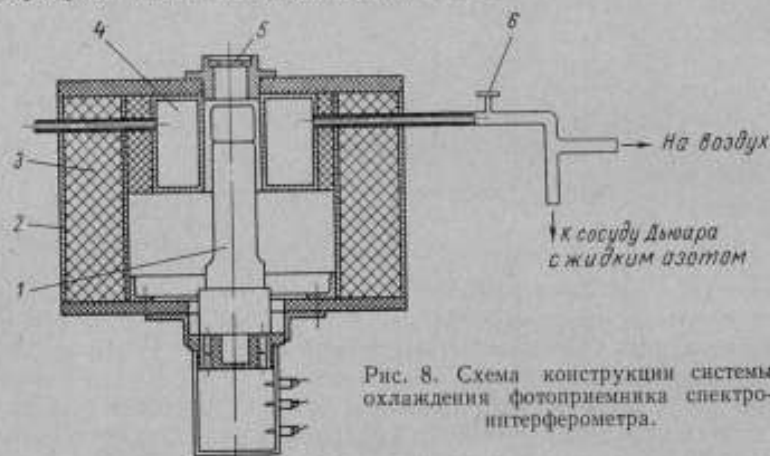


Рис. 8. Схема конструкции системы охлаждения фотоприемника спектроинтерферометра.

Датчик давления пульсатора для сканирования интерференционной картины представляет собой мембранный микроманометр с зеркальным индикатором, отмечающим равенство давления внутри камеры эталона Фабри—Перо атмосферному. Кроме визуальной отметки по шкале, встроено фотосопротивление подает сигнал той же отметки на выход усилителя типа Ф-116, т. е. на вход потенциометра типа ЭПП-09 [3].

Пульсатор соединен резиновым шлангом с камерой эталона Фабри—Перо через вакуумный кран, расположенный на передней панели интерференционного спектрометра (рис. 2). Пределы изменения давления можно регулировать упорами на штоке пульсатора, а скорость — муфтой коробки скоростей так, что период пульсации устанавливается в 1,5 или 3 мин.

При измерении длин волн в вакууме используют пьезосканирование и воздух из пространства камеры эвакуируют форвакуумным насосом типа РВН-20. Для контроля достигаемого вакуума служит термоманометр.

С целью проверки спектрального диапазона работы прибора были записаны спектры от различных источников света: в видимой области ФЭУ-51 записаны спектры от ламп с криптоном-86 и кадмием-114, в ближней инфракрасной области ФЭУ-28 — спектры естественного криптона, неона и излучение гелий-неонового лазера, генерирующего на линии 1,15259 мкм; в ультрафиолетовой области ФЭУ-51 и ФЭУ-39А — спектры цинка, излучаемые лампой с полым катодом, спектры ртути-198, излучаемые безэлектродной лампой, и естественного кадмия. Неоднократное повторение записи одних и тех же участков спектра показало высокую воспроизводимость записи.

Отсчетное устройство решеток предмонохроматора было градуировано визуально по линиям кадмия и криптона в видимой области спектра по первичной и вторичным эталонным световым волнам. Предварительная градуировка в ультрафиолетовой и инфракрасной областях была экстраполирована и уточнена расшифровкой спектров цинка, криптона и неона.

Неоднократные записи контуров известных линий спектров кадмия-114 и естественного криптона (при разности хода 63 мм с зеркалами, имеющими диэлектрические покрытия), а также контура излучения лазера, генерирующего на волне с длиной 1,15 мкм, дали возможность выяснить качество работы интерференционного узла спектрометра. Излучение лазера записано с кварцевым трубчатым эталоном, зеркала которого покрыты серебром (рис. 9).

Запись контуров с нанесением отметок позволила полностью испытать фотоэлектрический блок установки, а также записать контуры от двух источников. Следует отметить, что такая запись позволяет с погрешностью порядка $5 \cdot 10^{-8}$ сравнить близкие длины волн.



Рис. 9. Запись контура излучения лазера.

В заключение необходимо подчеркнуть, что предмонохроматор по разрешающей способности, светосиле и дисперсии вполне обеспечивает необходимые условия использования эталона Фабри—Перо. Таким образом, при правильной юстировке прибора, рациональном выборе щелей и разностей хода в эталоне можно с точностью спектроинтерферометрического метода $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-8}$ измерять длины волн в диапазоне 200—3000 нм в воздухе и вакууме, а также исследовать контуры спектральных линий. Интерференционный спектрометр можно использовать для изотопного спектрального анализа различных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батарчукова Н. Р., Карташев А. И. и Романова М. Ф. О возможности применения излучения стабильных четных изотопов кадмия для воспроизведения единицы длины. ДАН СССР, 1953, т. XC, № 2.
2. Chabbal R., Jacquinet P. Description d'un spectrometre interferentiel Fabry—Perot. «Rev. d'Opt», 1961, t. 40, № 4.
3. Ефремов Ю. П. Применение фотоэлектрической регистрации интерференционных полос. «Измерительная техника», 1958, № 6.

Поступила в редакцию 6/1 1967 г.

Ю. П. ЕФРЕМОВ

ВНИИМ

УДК 531.711 : 531.715

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ВНИИМ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ
ОБРАЗЦОВЫХ ПЛОСКОПАРАЛЛЕЛЬНЫХ КОНЦЕВЫХ МЕР
I-го РАЗРЯДА И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ЖЕЗЛОВ
ДЛИНОЙ ДО 1200 мм

Интерференционная установка ВНИИМ для измерения длины плоскопараллельных концевых мер I-го разряда от 200 до 1000 мм и геодезических кварцевых жезлов до 1200 мм (рис. 1) включает в себя:

1) горизонтальный интерферометр № 5 со стальным № 16 и кварцевым № 3 эталонами Фабри—Перо;

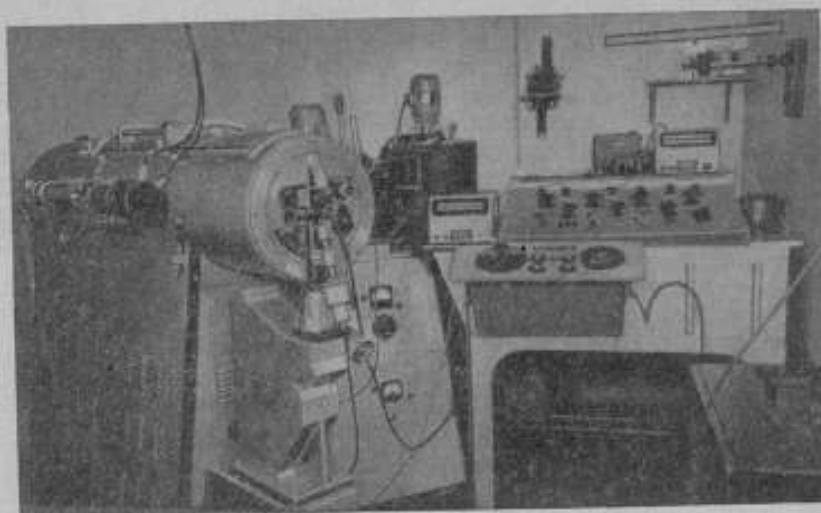


Рис. 1. Общий вид установки.

2) устройство для изменения оптической длины эталонов Фабри—Перо;
3) блоки фотоэлектрической регистрации интерференционных полос (рис. 2), измерения температуры и питания спектральных ламп;
4) ртутный барометр № 0191 для измерения атмосферного давления;
5) психрометр Ассмана № 1273 для измерения влажности воздуха.
Горизонтальный интерферометр является усовершенствованным вариантом универсального интерферометра ВНИИМ [1]. Оптическая схема

его представляет собой соединение двух интерферометров: многолучевого Фабри—Перо и двухлучевого Майкельсона.

Длину мер измеряют, используя интерференционные полосы переналожения в белом свете, возникающие при прохождении света последовательно через многолучевой и двухлучевой интерферометры, когда разности хода лучей во втором интерферометре кратны разности хода в первом (удвоенной оптической длине эталона Фабри—Перо). Длину эталонов предварительно измеряют абсолютным интерференционным методом.

Меру с притертой к одной из ее измерительных поверхностей вспомогательной пластиной помещают в одно из плеч интерферометра Майкельсона так, чтобы поверхность относительного зеркала, находящегося в другом плече, делила меру на части, кратные длине эталона $l = 100$ мм. Регулируя давление воздуха в эталоне, в процессе измерения так изменяют оптическую длину эталона $2ln$ (n — коэффициент преломления воздуха), чтобы длина меры стала точно кратной его длине [2]. Устройство для изменения оптической длины эталона (рис. 3) включает в себя небольшой ручной насос 10 поршневого типа, позволяющий изменять давление воздуха в эталоне 5 на $\pm (3300 \pm 4000)$ н/м², или $\pm (25 \pm 30)$ мм рт. ст., по сравнению с атмосферным, микроманометр 8, кран 9 и соединительные резиновые трубки. В положении крана 9 «Фотоэлектрическая регистрация» система 5, 8, 10 соединена с блоком фотоэлектрической регистрации интерференционных полос 11—



Рис. 2. Внешний вид блока фотоэлектрической регистрации.

19. Этот блок предназначен для определения дробных частей порядка интерференции ϵ в центре колец равного наклона при измерении длины эталона и состоит из:

фотоприставки 1 с фотоумножителем типа ФЭУ-19М;

высоковольтного выпрямителя 11 типа ВС-9 для питания делителя ФЭУ-19М;

усилителя постоянного тока, в который входят усилитель 14 типа Ф-16, блок питания 12 типа П-16 и самописец 13 типа Н-16;

насоса-пульсатора 19, приводимого в движение электромотором 17 через редуктор 18;

микроманометра-датчика атмосферного давления 15, смонтированного вместе с усилителем 14;

крана 16 с указателем положений «Атмосфера» и «Регистрация».

Насос-пульсатор 19, микроманометр-датчик давления 15 и кран 16 образуют систему, аналогичную системе изменения оптической длины эталона (5, 8, 9, 10). Электрическая схема отличается от опубликованной в работе [3] лишь способом подачи отметок атмосферного давления. Как описано в работе [3], при давлении воздуха в эталоне, равном атмосферному, луч света от осветителя микроманометра попадал на щель в экране, закрывающем фотозлемент типа ФЭСС, и импульс фототока регистрировался усилителем Ф-16. В данной конструкции луч через отверстие в крышке усилителя 14 попадает на один из фотозлементов фотокомпенсационной схемы, также вызывая импульс на выходе усилителя.

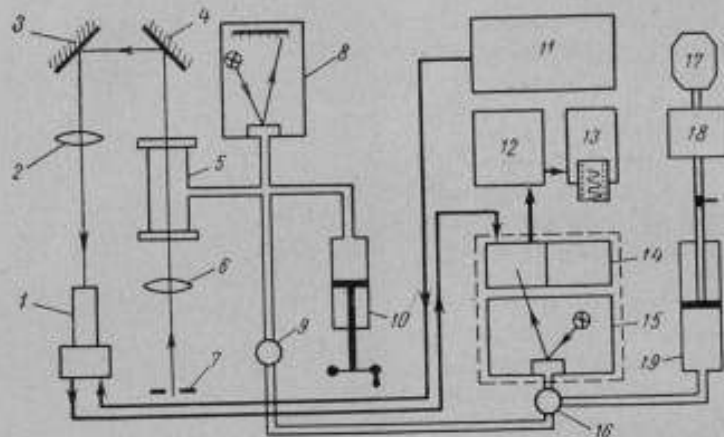


Рис. 3. Схема устройства для изменения оптической длины эталона и блока фотоэлектрической регистрации.

При измерениях длины эталона дробные части порядка интерференции ϵ определяют следующим образом. Во входную щель 7 интерферометра, расположенную в фокальной плоскости объектива 6, направляют свет одной из спектральных линий ^{114}Cd , ^{198}Hg или ^{86}Kr . Пройдя через эталон 5 и отразившись от зеркал 4 и 3, свет попадает в камеру с объективом 2, а затем на катод фотоумножителя фотоприставки. Фототок подается на усилитель 14 и регистрируется на ленте самописца 13.

Когда кран 9 находится в положении «Фотоэлектрическая регистрация», а кран 16 — в положении «Атмосфера», луч света от осветителя микроманометра 15 должен попасть на один из фотозлементов усилителя 14. Затем кран 16 переводят в положение «Регистрация», включают мотор 17, и насос 19 начинает изменять давление воздуха в системе. Когда давление увеличится или уменьшится на $650\text{--}800 \text{ н/м}^2$ ($5\text{--}6 \text{ мм рт. ст.}$), автоматически изменится направление вращения электромотора и, следовательно, давление воздуха начнет изменяться в обратную сторону. В момент, когда оно будет равно атмосферному давлению, луч света попадает на фотозлемент усилителя 14 и на ленте самописца появится отметка. Значение ϵ определяют по положению отметки между двумя соседними максимумами регистрограммы [3].

Блок фотоэлектрической регистрации удобно использовать для градуировки отсчетного микроманометра 8. Для этого интерференционные полосы записывали, выключая микроманометр 15 и следя за изменением давления по шкале градуируемого прибора 8. Наблюдатель, нажимая на кнопку, замыкал вход усилителя Ф-16, и на записи появлялись от-

метки, соответствующие известным отсчетам k по шкале (шкала микроманометра δ с нулем посередине имеет по 70 делений по обе стороны от нуля). Вид получаемой таким образом записи при атмосферном давлении $p_0 = 799,1$ мм рт. ст. и источнике света ^{198}Hg с $\lambda = 0,5461$ мкм показан на рис. 4, где 0, +10, -10 и т. д. — значения k , а $N + 4,73$ и т. д. — порядок интерференции, соответствующий этим k .

Определив разности порядков интерференции $N_k - N_0$, легко составить таблицу изменения оптической длины эталона $\Delta l = (N_k - N_0) \lambda/2$ (λ — длина волны монохроматического излучения) в зависимости от значений k . Результаты градуировки при этом не отличаются от результатов градуировки методом, описанным в работе [2].

Как видно из табл. 1, при различном атмосферном давлении p_0 одним и тем же значениям k соответствуют значения Δl , тем сильнее отличающиеся друг от друга, чем больше $|k|$ и больше различие в p_0 .

Длина используемых в установке эталонов Фабри — Перо такова, что при измерениях в большинстве случаев разрежают в них воздух, поэтому в табл. 1 приведены данные градуировки только для отрицательных значений k .

Обычно строят графики зависимости Δl от k и, если меры измеряют при давлении, отличающемся от давлений, при которых производили градуировку, значение Δl для данного k находят интерполированием. Средняя квадратическая погрешность измерения Δl , как показал опыт работы, составляет $\delta l = 0,006$ мкм.

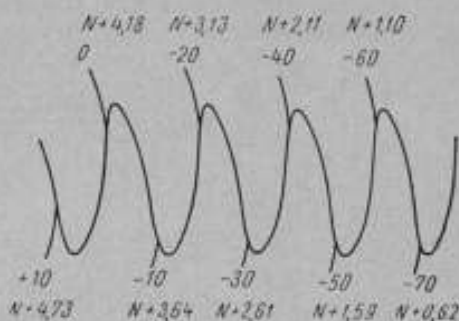


Рис. 4. Регистрограмма градуировки отсчетного микроманометра.

Таблица 1

Изменение оптической длины эталона в зависимости от атмосферного давления (при $l = 100$ мкм)

Отсчет k по шкале микроманометра	Значения Δl (мкм) при p_0 мм рт. ст.		
	745,1	759,8	779,1
-40	-0,535	-0,546	-0,565
-50	-0,650	-0,675	-0,707
-60	-0,776	-0,801	-0,841
-70	-0,904	-0,931	0,972

Блок для измерения температуры мер и эталона (рис. 5) имеет платиновый термометр сопротивления (№ 648) 5 в патроне 6 из красной меди, термометрический мост 8 типа ТМ1-а, дифференциальные медь-константановые термопары 1—3, зеркальный гальванометр 9 с осветителем 10 и шкалой 11 для измерения т. э. д. с., а также переключатель термопар 7 типа ПБТ-12. Патрон 6 имеет вырез, в который помещают медную колодку 4 с впаянными в нее концами термопар 1 и 2. Термопара 3 служит для измерения градиентов температуры вдоль меры. Сопротивление платинового термометра, изготовленного во ВНИИФТРИ, при 20° С

равно 13,2468 ом, а температурный коэффициент 0,0491 ом/град. Гальванометр 9 и осветитель 10 со шкалой 11 установлены на кронштейнах в стене на расстоянии около 2 м друг от друга.

Постоянная термопар 1 и 3 равна 0,0015, а термопары 2 — равна 0,0016 град/дел. Хотя разность температур двух спаев термопар можно определить с погрешностью менее $\pm 0,001$ град, из-за погрешностей измерения сопротивления платинового термометра, наличия градиентов температуры и других причин средние квадратические погрешности измерения температуры эталона и меры фактически равны $\delta t_s = 0,002$ град; $\delta t_m = 0,003$ град.

Система автоматического регулирования температуры воздуха в помещении, состоящая из ртутных контактных термометров, реле и элек-

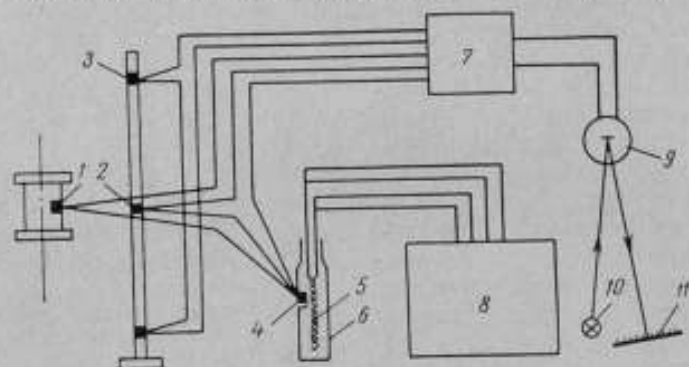


Рис. 5. Схема блока измерения температуры.

тропечей, поддерживает температуру воздуха вокруг интерферометра равной $(20 \pm 0,1)^\circ \text{C}$. Изменения температур меры и эталона во время измерений не превышают 0,01 град/ч, разность их температур не превышает 0,006 град, а температурный градиент вдоль меры длиной 800—1000 мм составляет 0,006—0,008 град.

Результат измерения длины меры на установке

Отклонение длины меры от ее номинала при 20°C вычисляют по формуле, аналогичной приведенной в работе [2],

$$\Delta L_{20} = L [10(\Delta l_{20} + \Delta l) + \alpha_s(t_s - 20) - \alpha_m(t_m - 20) + \pm 0,938(t_m - t_s)] \text{ мкм}, \quad (1)$$

где L — длина меры, м;
 Δl_{20} — отклонение длины эталона от 100 мм при 20°C , мкм;
 Δl — изменение оптической длины эталона, при котором длина меры кратна длине эталона, мкм;
 t_s и t_m — температуры эталона и меры, $^\circ \text{C}$;
 α_s и α_m — температурные коэффициенты удлинения эталона и меры, мкм/(м·град).

Согласно «Инструкции 100—60 по поверке плоскопараллельных концевых мер длины» меры 1-го разряда следует измерять при температуре, отличающейся от 20°C не более, чем на $\pm 0,1$ град. Стальные меры по ГОСТ 9038—59 могут иметь $\alpha_m = (11,5 \pm 1,0)$ мкм/(м·град).

При расчете средних квадратических погрешностей измерения меры δ на установке будем полагать, что погрешности, обусловленные допу-

стимыми пределами отклонения температуры измерения от 20° С, температурных коэффициентов удлинения α_s и α_m и длин волн λ от их действительных значений, подчиняются закону равной вероятности. Тогда, как известно [4], $\delta = \frac{\delta_{\text{пр}}}{\sqrt{3}}$ ($\pm \delta_{\text{пр}}$ — предельная погрешность).

Полагая $\delta \epsilon = 0,01$, $\delta t_s = 0,002$ град, $\delta p = \delta f = 0,1$ мм рт. ст. (p и f — давление и влажность воздуха), $\delta \alpha_s = 0,05$ мкм/(м·град), $t - 20^\circ = \pm 0,1^\circ$ С и $\delta \lambda_{\text{пр}} = \pm (5 \div 7) \cdot 10^{-8}$ λ для ^{198}Hg и ^{114}Cd , найдем средние квадратические погрешности измерения эталонов δl_{20} длиной 100 мм равными: стальных $\approx 0,0061$ и кварцевых $\approx 0,0057$ мкм.

Средняя квадратическая погрешность определения изменения длины эталона Δl равна $\delta l = 0,006$ мкм; средние квадратические погрешности слагаемых суммы (1) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние квадратические погрешности δ слагаемых выражения (1)

Слагаемое	Значения δ (мкм) для				$\frac{(\alpha_m + \delta \alpha_m) \cdot 10^6 \text{ град}^{-1}}$
	стальных	кварцевых	стальных	кварцевых	
	эталон		мер		
Первое	0,088	0,083	—	—	—
Второе	0,020	0,003	—	—	—
Третье	—	—	0,068	—	11,5 ± 1
	—	—	0,035	—	11,5 ± 0,1
	—	—	—	0,003	0,5 ± 0,05
Четвертое	—	—	0,003	0,003	—

Таким образом, при измерении стальной меры длиной 1 м с помощью стального или кварцевого эталона средняя квадратическая погрешность: $\delta L \approx 0,11$ мкм, если $\delta \alpha_m = \pm 1$ мкм/(м·град); $\delta L \approx 0,094$ мкм, если $\delta \alpha_m = \pm 0,1$ мкм/(м·град).

При измерении кварцевой меры длиной 1 м (при тех же условиях) по стальному эталону $\delta L \approx 0,088$ мкм, а по кварцевому $\delta L \approx 0,083$ мкм.

В табл. 3 приведены результаты измерений длины двух стальных и двух кварцевых эталонов Фабри—Перо длиной 100 мм.

Как видно из табл. 3, средние квадратические погрешности измерений

$$\delta l_{20} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_{\text{ср}})^2}{n-1}}$$

близки к рассчитанным выше.

Результаты измерений длины некоторых мер приведены в табл. 4.

Каждое измерение производили после длительной выдержки (не менее 7 ч) эталонов и мер в закрытом интерферометре. При этом были использованы не только эталоны № 16 и № 3, но и эталоны Б№ 1 и Опт. № 2.

Приведенные в табл. 4 результаты измерений метров № 2, ЭК-1 и жезла ЛПИ получены при одной притирке вспомогательной пластины, а для остальных мер — при двух и более притирках. Средние квадратические погрешности δL_{20} близки к рассчитанным выше и к средним квадратическим погрешностям измерений мер на большом горизонтальном [2] и универсальном [5] интерферометрах.

Таблица 3

Отклонения действительной длины эталонов от номинальной при 20° С

Номер измерения	Значения ΔL_{20} эталонов, мкм			
	стальных		кварцевых	
	№ 16	В№ 1	Опт. № 2	№ 3
1	0,422	0,219	16,596	0,436
2	13	28	76	36
3	09	26	89	33
4	20	19	84	37
5	20	03	80	47
6	14	19	92	40
7	15	33	95	40
8	18	18	92	28
9	22	12	83	39
10	23	18	92	39
11	06	21	94	51
12	0,409	0,229	16,592	0,435
Среднее	0,414	0,221	16,589	0,438
Средняя квадратическая погрешность	0,006	0,008	0,0065	0,006

Среднее из результатов измерений длины метра № 2 при двух притирках $\Delta L_{20} = 157,87$ мкм совпадает в пределах точности измерений с результатами измерений этого метра на большом горизонтальном интерферометре. Совпали также и результаты определения длины H-образного метра ЭК-1.

Допускаемая предельная погрешность измерения срединной длины концевых мер 1-го разряда согласно инструкции равна $\pm (0,05 + 0,5L)$ мкм, где L — длина меры в метрах. Следовательно, данная установка ВНИИМ вполне пригодна для измерения длины образцовых плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда.

С целью выявления систематических погрешностей было измерено на исследуемой установке несколько мер длиной от 100 до 300 мм методом сравнения с эталоном Фабри — Перо и абсолютным интерференционным методом. В первом случае к мерам 125, 150, 175 мм притирали хорошо изученные меры 75, 50 и 25 мм соответственно, так что каждый раз с эталоном Фабри — Перо сравнивали блок мер длиной 200 мм. Во втором случае эталон Фабри — Перо вынимали из прибора, который превращался, таким образом, в горизонтальный двухлучевой интерферометр. Для мер до 175 мм использовали источники света с ртутью-198 и кадмием-114, для мер 200 и 300 мм — только с ртутью-198. Результаты измерений приведены в табл. 5. Расхождения не превышают допустимых погрешностей измерений мер 1-го разряда.

Известный интерес представляло также сравнение исследуемого интерферометра с интерферометром типа Кестерса № 41591, входящего в установку ВНИИМ.

Таблица 4

Отклонения ΔL_{20} (мкм) действительной длины мер при 20° С от номинальной

Номинальная длина (м) и номер (тип) меры	1, № 2	1,2, Жезл ЛПИ	1, ЭК-1	0,9, № 7088	1, № 7088	1, № 11541
$(a_M \pm \delta a_M) \cdot 10^4 \text{ град}^{-1}$	$8,74 \pm 0,02$	$0,5 \pm 0,1$	$11,4 \pm 0,1$	$11,5 \pm 1$	$11,5 \pm 1$	$11,5 \pm 1$
Эталоны	Опт. № 2	№ 3	Б№ 1	№ 16	№ 16, Б№ 1	Б№ 1, № 3
Значения ΔL_{20}	157,78	5,47	0,66	-0,69	-0,67	-3,09
	82	62	67	72	80	-3,16
	90	57	64	64	58	-2,93
	82	68	65	65	60	-3,12
	75	47	55	58	77	-3,01
	93	51	63	56	71	-2,97
	75	52	62	62	78	—
	70	59	67	58	78	—
	81	64	66	86	—	—
	71	44	58	67	—	—
93	—	64	—	—	—	
Среднее	157,81	5,55	0,63	-0,66	-0,71	-3,05
Средняя квадратическая погрешность δL_{20}	0,08	0,08	0,04	0,09	0,10	0,09

Таблица 5

Отклонения действительной длины мер при 20° С от номинальной

Мера		Значения ΔL_{20} (мкм) при измерении методом		
номинальная длина, мм	номер	сравнения на интерферометре № 5	абсолютным на интерферометре	
			№ 5	№ 41591
100	2	+0,18	+0,19	0,17
100	7088	-0,44	-0,44	0,42
125	380	-0,06	-0,08	-0,09
150	1965	—	+0,16	+0,20
150	380	—	+0,06	+0,01
150	2702	+0,24	+0,27	—
175	1965	-0,18	-0,13	—
175	2702	+0,50	+0,42	—
200	11541	-1,73	-1,74	—
200	14159	-0,59	-0,52	—
200	ЕМ	-0,54	-0,52	—
300	ЕМ	+0,68	+0,76	—

ВНИИМ систематически проводит сличения интерференционных установок для поверки концевых мер 1-го разряда длиной до 100 мм. Результаты сличения считаются удовлетворительными, если расхождения при измерениях одних и тех же мер длиной 100 мм на установках ВНИИМ и других институтов не превышают $\pm 0,04$ мкм [6].

Как видно из табл. 5, расхождения результатов измерения мер длиной 100 мм на установках с интерферометрами № 5 и № 41591 не превышают $\pm 0,02$ мкм. Следовательно, можно считать, что единство измерений концевых мер длины на обеих установках поддерживается с должной точностью.

Большая часть работы по юстировке и подготовке установки к измерениям была выполнена О. Ю. Шошиной и Л. И. Смирновой. В измерениях, результаты которых приведены в данной статье, принимала участие Е. И. Латышева.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волкова Е. А., Карташев А. И., Романова М. Ф. и Степанов В. С. Универсальный интерферометр системы ВНИИМ для измерения концевых мер и геодезических кварцевых жезлов длиной до 1200 мм. «Труды ВНИИМ», вып. 26 (86). М.—Л., Машгиз, 1955.
2. Романова М. Ф. и Карташев А. И. Исследование интерференционной установки для воспроизведения метра в длинах световых волн. «Труды ВНИИМ», вып. 7 (67). Л., 1949.
3. Ефремов Ю. П. Измерение длины волн линий криптона-86 в инфракрасной области спектра. «Труды ВНИИМ», вып. 40 (100). М.—Л., Стандартгиз, 1959.
4. Рабинович Б. Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. «Труды институтов Комитета», вып. 57 (117). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
5. Волкова Е. А. и Владимиров И. П. Исследование универсального интерферометра системы ВНИИМ для измерения концевых мер и геодезических жезлов длиной до 1200 мм. «Труды ВНИИМ», вып. 26 (86). М.—Л., Машгиз, 1955.
6. Алексеева Е. П., Шошина О. Ю. Сличение интерференционных установок институтов Комитета. «Труды институтов Комитета», вып. 47 (107). Стандартгиз, 1961.

Поступила в редакцию 23/IV 1965 г.

УДК 531.715

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ КОНТУРА
ЗЕЛЕННОЙ ЛИНИИ РТУТИ-198

Как известно, одной из вторичных эталонных световых волн λ является $\lambda = 546$ нм изотона ртути-198. Точность воспроизведения ее длины $5 \cdot 10^{-8}$. Дальнейшее повышение этой точности возможно при более строгих условиях возбуждения спектра ртути. С целью уточнения спецификации условий возбуждения была исследована зависимость от температуры стенок лампы уширения, симметрии и смещения максимума контура излучения пяти безэлектродных ламп (внутренний диаметр 5 мм, длина 100 мм), заполненных аргоном при различных давлениях (0,3 — 10 мм рт. ст.). Четыре из этих ламп отечественного производства [1] и одна фирмы ОСРАМ. Каждую лампу помещали в охлаждающую рубашку, соединенную с термостатом ТС-16, из которого поступала вода определенной температуры.

Полуширину и длину волн спектральных линий измеряли на установке ВНИИМ [2]. Свет от лампы, излучающей исследуемую длину волны, с помощью системы призм направляли на щель коллиматора, а затем на эталон Фабри — Перо, помещенный в вакуумную камеру. Через призмы и камеру спектрографа свет поступал в регистрационное устройство (фотоэлектронный умножитель ФЭУ-19, фотокомпенсационный усилитель Ф-16 и самописец ЭПП-09).

По полученным регистрограммам контура зеленой линии ртути-198 определяли наблюдаемую полуширину контура и смещения максимума в зависимости от изменения температуры стенок лампы.

Значение аппаратурной полуширины a подсчитывали по формуле

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}, \quad (1)$$

$$a_1 = \frac{l - R}{\pi \sqrt{R}}; \quad a_2 = \frac{lr^2}{\lambda f^2},$$

где a_1 и a_2 — аппаратурная ширина, определяемая соответственно коэффициентом отражения зеркал и геометрическими параметрами схемы установки;

R — коэффициент отражения зеркал эталона Фабри — Перо;

l — длина разделителя эталона;

λ — длина волны излучения;

f — фокусное расстояние объектива камеры;

r — радиус диафрагмы, выделяющей центральную часть интерференционной картины.

Истинную полуширину контура рассчитывали по приближенной формуле Бюргера и Ван-Ситтерта

$$W = 0,64a + 0,98\omega, \quad (2)$$

где W и ω — соответственно наблюдаемая и истинная полуширина.

Зависимость истинной полуширины контуров зеленой линии от изменения температуры показана на рис. 1.

Из графика видно, как и следовало ожидать, что во всех лампах наблюдается одинаковый ход увеличения полуширины линии с ростом температуры, за исключением одной лампы, у которой эта зависимость

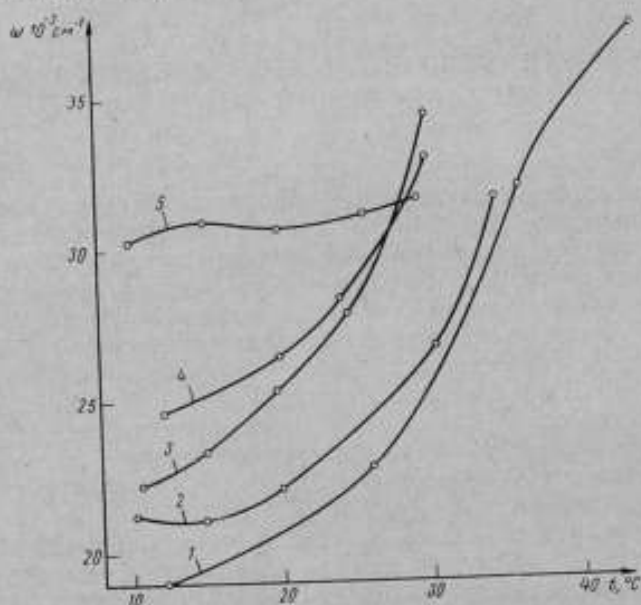


Рис. 1. Зависимость полуширины контуров зеленой линии ртути-198 от изменения температуры.

1, 2, 3, 5 — лампы отечественные; 4 — лампа фирмы OSRAM.

почти не наблюдается. Последнее можно объяснить, по-видимому, тем, что в данной лампе давление аргона достаточно большое ($\sim 10 \text{ мм рт. ст.}$) и, следовательно, линия уже сильно расширена. Поэтому заметить уширение контура при незначительном изменении температуры не представляется возможным, как это уже указано в работе Тако [3].

Начиная с 25°C , появляется самообращение линии, которое достигает на регистрограмме заметной величины после 30°C (рис. 2).

Пользуясь кривыми Тако [3], можно приблизительно подсчитать давление аргона в исследуемых лампах. В нашем случае эти значения соответствовали давлениям, указанным в паспортах ламп в момент заполнения их аргоном.

Кроме исследования формы и полуширины контура линии, были определены длины волны видимой области спектра. При этом за длину волны вторичного эталона принимали длину волны, испускаемой лампой фирмы OSRAM, которую сравнивали предварительно с первичным эталонным излучением.

При сравнении длин волн использовали метод последовательной попеременной записи контуров линий. Поддерживая в охлаждающих

Рис. 2. Регистрограмма контура зеленой линии ртути-198 при температуре 35° С (t — время; I — интенсивность излучения).

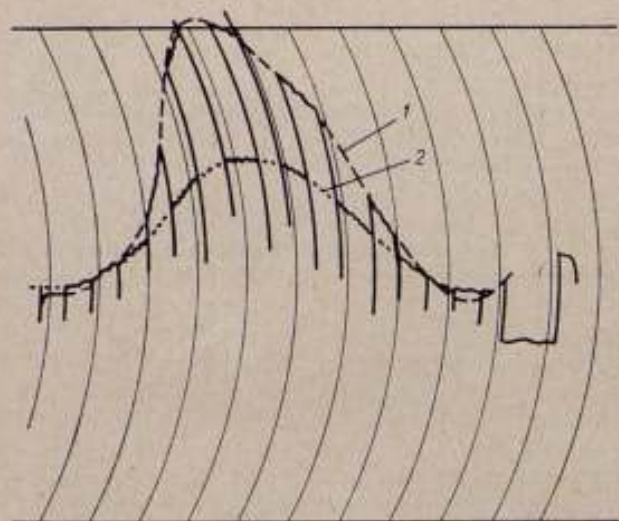
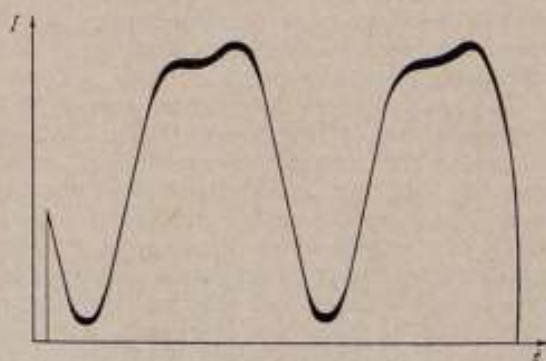
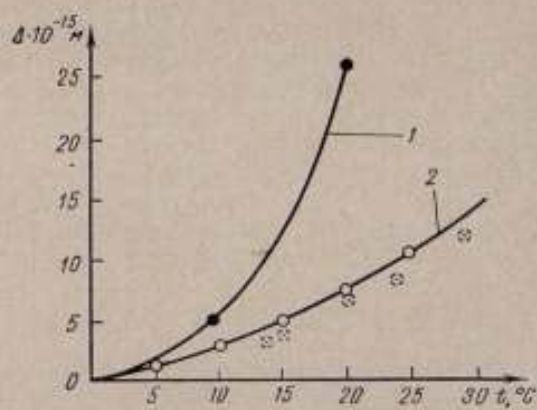


Рис. 3. Регистрограмма последовательной попеременной записи контуров зеленой линии ртути-198 для двух ламп: фирмы OSRAM (1) и отечественной (2).

Рис. 4. Зависимость смещения Δ длины волны зеленой линии ртути-198 от температуры.

1 — измерения Терьепа [4], 2 — измерения Роулен [5].



рубашках обеих ламп строго определенную спецификацией температуру 10°C , записывали почти одновременно оба контура соответствующих линий. По положению максимумов судили о смещениях длин волн. В пределах точности измерений длины волн в лампе фирмы ОСРАМ и отечественных лампах совпадали.

Поддерживая постоянной и равной 12°C температуру лампы ОСРАМ, а температуру отечественной лампы изменяя от 12 до 30°C и записывая контуры последовательно-переменно, находили зависимость длины волны зеленой линии ртути-198 от температуры (рис. 3). Смещение максимумов определяло смещение длины волны, соответствующее разности температур. Эта зависимость представляла интерес еще и потому, что результаты измерений, проведенных в Международном бюро мер и весов и в Национальной физической лаборатории (по отчету МБМВ за 1964 г.) не совпадали; их различие значительно превышало погрешность измерения (рис. 4). В результате измерений во ВНИИМ были получены пять точек (показаны на рис. 4 пунктиром), которые в области температур $14\text{--}29^{\circ}\text{C}$ хорошо совпадают с данными НФЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Р. Стриганов, Ю. П. Донцов. Ртутный одноизотопный источник света и определение свечения захвата тепловых нейтронов изотопом Li^{6} . «Оптика и спектроскопия», т. II, 1967, вып. I.
2. Н. Р. Батарчукова. Новое определение метра. М., Изд. стандартов, М., 1964.
3. Т. Такэ М. Ohl. Analyse du profil spectral de radiations visibles du mercure 198 et du cadmium 114. «Com. Cons. p. la déf. du mètre», 3e sess. (1962), Paris, 1964.
4. J. Terrien. Interferometrie. «Proc. Verb. Com. Int. de Pds. et Mess. Paris, 1963.
5. W. R. C. Rowley. La symétrie des raies spectrales. «Com. Cons. p. la déf. du mètre», 3e sess. (1962), Paris, 1964.

Поступила в редакцию 10/III 1967 г.

УДК 621.375.8 : 531.715.1

СТАБИЛИЗАЦИЯ ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫХ ЛАЗЕРОВ И ПРИМЕНЕНИЕ ИХ ДЛЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛИНЫ

Широкому использованию оптических квантовых генераторов (лазеров) в качестве источников света для интерференционных измерений длины способствуют два обстоятельства: необычайно большая яркость источника и исключительно малая спектральная ширина генерируемого излучения. Первое из этих обстоятельств существенно облегчает наблюдение и регистрацию интерференционных полос, второе — значительно расширяет пределы абсолютных интерференционных измерений длины.

Если предельная разность хода (длина когерентности) эталонного излучения оранжевой линии криптона-86 с длиной волны 0,6057 мкм примерно равна 0,75 м, то для излучения гелий-неоновых лазеров она превышает десятки километров. Уже в 1963 г. в НБС (США) удалось наблюдать интерференционные полосы при разности хода 0,2 км [1].

Обычно лазер генерирует несколько отдельных частот в пределах контура линии, на которой происходит генерация. Число генерируемых частот зависит в основном от соотношения между шириной контура линии на уровне порога генерации (областью генерируемых частот ω) и расстоянием между резонансными частотами лазера $\Delta\nu = c/2L$ (c — скорость света; L — длина резонатора).

Для интерференционных измерений необходимо, чтобы лазер генерировал либо только одну частоту, либо из многих частот была выделена одна, например с помощью эталона Фабри — Перо.

Самыми простыми способами достижения режима работы лазера на одной частоте являются изменение мощности разряда и внесение дополнительных дифракционных потерь (например, ограничением эффективного диаметра разрядной трубки или некоторым разъюстированием резонатора наклоном одного из зеркал). Оба способа приводят к подавлению генерации высших типов колебаний, повышению порога генерации и уменьшению возможной области генерируемых частот ω .

Лазер генерирует одну частоту во всей области ω , если $\omega < \Delta\nu$. При $\Delta\nu < \omega < 2\Delta\nu$ одну частоту он генерирует лишь в области $\delta\nu = 2\Delta\nu - \omega$ (рис. 1).

Так как частоту генерации ν определяют из условия, что $k = \frac{2Ln}{c} \nu$ (n — коэффициент преломления среды между зеркалами резонатора) есть целое число, то любые изменения оптической длины Ln резонатора, например вследствие теплового расширения или изменения давления воздуха между зеркалами и разрядной трубкой, приводят к смещению ν .

В настоящее время наиболее перспективной является стабилизация частоты оптических квантовых генераторов [2, 3] по контуру спектральной линии*, обеспечивающая также высокую воспроизводимость частоты генерации. Этот способ был впервые осуществлен применительно к генераторам сантиметровых радиоволн [4], а затем и к оптическим [5]. Лазер в данном случае должен иметь магнитострикционное [5] или пьезоэлектрическое [6, 7] устройство, допускающее регулировку длины резонатора и, следовательно, частоты генерируемого излучения.

Подавая на магнитострикционный или пьезоэлектрический элемент небольшое переменное напряжение, достаточное для колебаний длины резонатора с амплитудой $\lambda/40 - \lambda/100$, на выходе лазера получают излучение, частично промодулированное по частоте и амплитуде, которое регистрируют с помощью фотоприемника. Когда частота генерации совпадает с частотой максимума контура линии, амплитуда переменной составляющей фототока минимальна, а постоянной составляющей — максимальна. Стабилизация лазера и заключается в поддержании частоты генерации равной частоте максимума контура линии. Изменения оптической и механической длины резонатора компенсируют изменением расстояния между его зеркалами, подавая соответствующее постоянное напряжение на пьезоэлектрическое или магнитострикционное устройство вручную или автоматически с помощью системы обратной связи. Точность стабилизации частоты лазера вручную — порядка $1 \div 2 \cdot 10^{-8}$ [5, 6]. С помощью сложной системы [8] автоматического выведения частоты генерации на центр спектральной

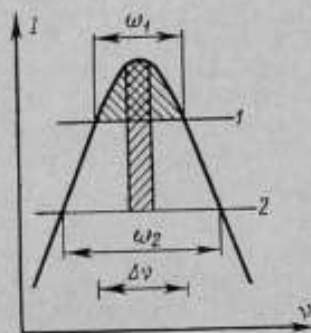


Рис. 1. Изменение области частот (заштрихованной), в которой возможна генерация одной частоты для двух уровней порога генерации 1 и 2 (ν и I — соответственно частота и интенсивность излучения).

ной линии при определенных условиях возбуждения лазера на смеси He и ^{20}Ne (или ^{22}Ne) была обеспечена точность стабилизации порядка 10^{-10} .

Во ВНИИМ исследованы газовые лазеры типов ОКГ-11 и ЛГ-34М, разработана система их стабилизации и с помощью стабилизированного лазера ОКГ-11 измерена длина концевых мер от 125 до 1000 мм.

Характеристики лазеров типов ОКГ-11 и ЛГ-34М и схема их стабилизации

Лазеры типов ОКГ-11 и ЛГ-34М работают в непрерывном режиме, длина волны рабочего перехода $\lambda = 0,633$ мкм. Плоское и сферическое (с радиусом $R \approx 1,2$ м) зеркала резонатора ОКГ-11 укреплены на расстоянии $L \approx 500$ мм друг от друга; разрядная трубка с окнами, расположенными под углом Брюстера, заполнена смесью гелия и неона в отношении 5 : 1 при давлении 1,1 мм рт. ст. и возбуждается постоянным током 12—30 ма. Расстояние между зеркалами лазера ЛГ-34М равно примерно 1,2 м, возбуждается трубкой высокочастотным разрядом.

Схема стабилизации лазеров приведена на рис. 2. Одно из зеркал лазера 1 укреплено на пьезокерамическом цилиндре 2, к которому подвели напряжение постоянного тока до 1 кв от потенциометра 6 и переменного — от генератора звуковой частоты 10. Полупрозрачное зер-

* Под контуром спектральной линии подразумевается кривая зависимости выходной мощности лазера от частоты (при работе лазера на одной частоте).

кало 3 направляло часть света на фотоумножитель 4. Переменную составляющую тока фотоумножителя регистрировали осциллографом 7, постоянную — ламповым вольтметром 11. С одинаковым успехом использовали фотоумножители двух типов: ФЭУ-19М и ФЭУ-26. Источником питания 5 служила батарея сухих элементов или выпрямитель типа ВС-9.

Эталон Фабри — Перо 8 со зрительной трубой 9 использовали в качестве оптического анализатора спектра для наблюдения количества генерируемых лазером частот. На рис. 3, а и б показан вид поля зрения при применении эталона Фабри — Перо длиной 100 мм, а на рис. 3, в длиной 1000 мм.

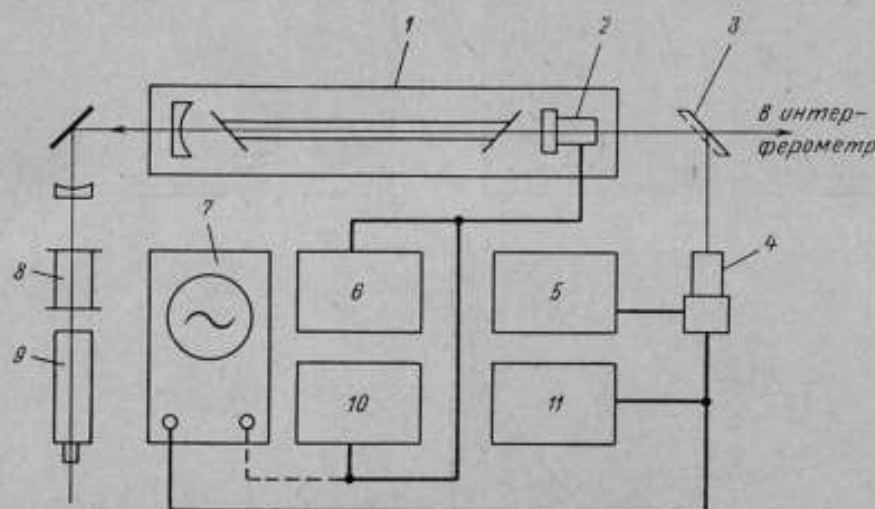


Рис. 2. Схема стабилизации газовых лазеров.

Сканирование длины резонатора производили с частотой 25 гц и амплитудой $V_{ск} = 8$ в, что соответствовало в линейной мере $\lambda/50$ (рис. 4, а). При развертке луча с частотой сканирования на экране осциллографа наблюдали кривые показанного на рис. 4, б вида, несколько искаженные колебаниями мощности генерируемого излучения из-за остаточной пульсации напряжения источника питания разрядной трубки. При частоте развертки луча, вдвое большей частоты сканирования (рис. 4, в), точность выведения частоты генерации на максимум спектральной линии оказалась несколько выше, чем при развертке с частотой 25 гц.

Точность стабилизации и воспроизведения длины волны излучения лазера проверяли с помощью эталонов Фабри — Перо длиной 100 и 1000 мм по смещению интерференционных полос при разностях хода 200 и 2000 мм. Изменение порядка интерференции во время наблюдения интерференционных колец через эталон длиной 1000 мм не превышала $\pm 0,02$ при последовательных выведениях частоты генерации на максимум контура линии. С такой же точностью порядок интерференции оставался постоянным при поддержании частоты генерации стабильной от нескольких минут до одного часа. Кроме эталонов Фабри — Перо, для той же цели использовали горизонтальный интерферометр ВНИИМ и концевые меры длиной 1 м.

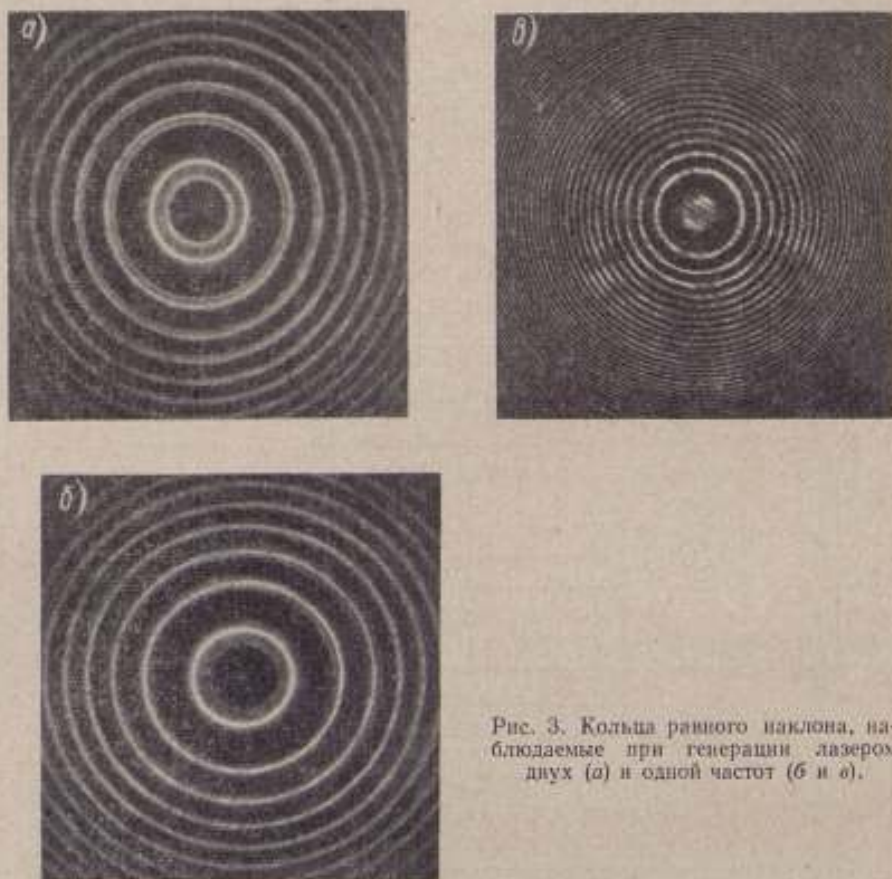
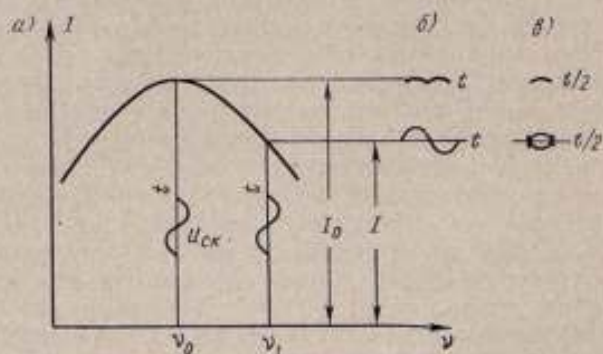


Рис. 3. Кольца равного наклона, наблюдаемые при генерации лазером двух (а) и одной частот (б и в).

Рис. 4. Форма выходного сигнала на экране осциллографа при частоте генерации ν_0 , соответствующей максимуму и частоте ν_1 , близкой к ν_0 при разных периодах развертки t и $t/2$.



Смещение длины волны стабилизированного лазера типа ОКГ-11 в зависимости от мощности генерации

Близкая к максимуму часть контура линии неона с длиной волны $\lambda = 0,633$ мкм в лазере типа ОКГ-11 подробно описана в работе [6].

Согласно теории газовых лазеров Лэмба [9] кривая мощности генерации может иметь провал, центр которого совпадает с центром спектральной линии, расширенной вследствие эффекта Доплера. Так как естественный неон состоит из смеси изотопов ^{20}Ne и ^{22}Ne , этот провал обычно асимметричен и в случае лазера ОКГ-11 расположен на расстоянии 110–130 Мгц от максимума [6]. Изменение мощности генерации приводит к изменению глубины провала, поэтому следует ожидать и смещения положения максимума.

Экспериментальные результаты исследования зависимости смещения $\Delta\lambda$ длины волны λ_{max} соответствующей максимуму контура линии лазера ОКГ-11, от мощности генерации W приведены на рис. 5. Мощность излучения лазера измеряли с помощью фотоэлемента типа ФЭСС и гальванометра. Мощность генерации изменяли, незначительно наклоняя сферическое зеркало лазера, при постоянном разрядном токе.

Смещение $\Delta\lambda$ быстро достигает максимального значения при возрастании мощности генерации до 40–50% от максимальной в режиме работы лазера на одной частоте. При дальнейшем возрастании мощности смещения почти не наблюдалось (оно было не больше погрешностей измерения). Этот режим работы, когда мощность генерации составляет 50–80% от максимально возможной, может быть рекомендован для интерференционных измерений длины. Область мощностей, близких к максимальной, не рекомендуется из-за очень малой области частот $\Delta\nu$, в которой возможен в этом случае режим работы лазера на одной частоте.

Длина волны излучения лазера типа ОКГ-11 и измерение концевых мер длины

Излучение любого источника света может быть применено для интерференционных измерений длины, если известна длина волны этого излучения.

Длина волны λ_{max} стабилизированного лазера ОКГ-11 была измерена относительно длины волны зеленой линии ртути-198, для чего была использована двухлучевая часть интерферометра ВНИИМ [10] и концевые меры длиной 100–200 мкм. Длину волны зеленой линии ртути-198 в нормальном воздухе (при температуре 20°C , давлении 760 мм рт. ст. и влажности 10 мм рт. ст.) принимали равной 0,54607821 мкм. Мощность лазера поддерживали равной 40–50% от максимальной.

Дробную часть порядка интерференции для четырех линий видимой области спектра ртути-198 и красной линии лазера отсчитывали визуально

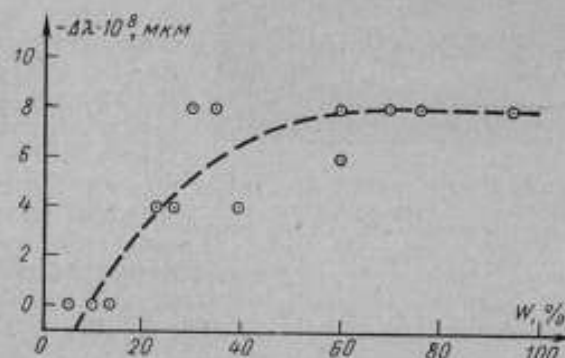


Рис. 5. Зависимость смещения $\Delta\lambda$ длины волны λ_{max} для лазера типа ОКГ-11 от мощности генерации W .

с погрешностью $\pm 0,05$. Температуру мер измеряли с погрешностью $\pm (0,002 \div 0,003)$ град, давление и влажность воздуха — с погрешностью $\pm 0,1$ мм рт. ст. Результаты измерений представлены в табл. 1.

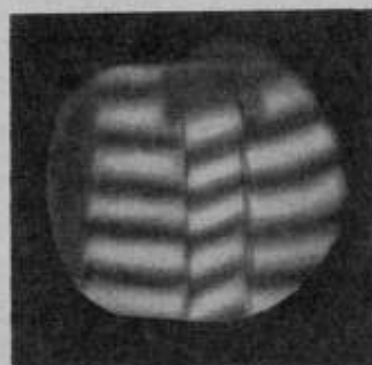


Рис. 6. Полосы равной толщины, наблюдаемые при измерении концевой меры 1000 мм с помощью лазера.

Значение длины волны $\lambda_{\text{max}} = 0,63281968$ мкм в нормальном воздухе найдено как среднее взвешенное из 25 отдельных измерений, при этом полагали вес каждого измерения пропорциональным разности хода, при которой производили измерение. Средняя квадратическая погрешность измерения длины волны равна $\sigma = 5 \cdot 10^{-4}$ мкм.

Среднее взвешенное значение λ_{max} стабилизированного излучения лазера ОКГ-11 использовали для измерения абсолютным интерференционным методом длины концевых мер от 125 до 1000 мм. Длину этих мер определяли, кроме того, на интерферометре ВНИИМ абсолютным методом, применяя в качестве источника света лампу с ^{198}Hg (меры до 250 мм), и методом сравнения с эталоном Фабри —

Перо длиной 100 мм (меры от 200 до 1000 мм). Вид поля зрения интерферометра при измерениях длины меры 1000 мм показан на рис. 6.

Таблица 1

Результаты измерения λ_{max} лазера типа ОКГ-11

Номер измерения	Значения λ_{max} (мкм) для различной длины концевых мер, мм		
	200	125—175	100
1	0,63281960	0,63281963	0,63281973
2	71	63	69
3	69	68	61
4	65	68	73
5	63	0,63281968	0,63281962
6	73		
7	67		
8	74		
9	69		
10	78		
11	63		
12	75		
13	71		
14	66		
15	0,63281967		
Среднее	0,63281969	0,63281966	0,63281968
Среднее взвешенное	$\lambda_{\text{max}} = 0,63281968$		

Таблица 2

Результаты измерений длины мер

Номинальная длина мер, мм	Отклонения действительной длины мер от номинальной, измеренные с помощью		
	эталопа Фабри — Перо	^{198}Hg	излучения лазера
125	—	-0,66	-0,66
150	—	+0,72	+0,70
175	—	-0,04	-0,02
200	+1,34	+1,32	+1,33
250	+1,01	+1,05	+1,07
700	-1,96	—	-1,96
1000	-3,05	—	-3,13
1000	+157,87	—	+157,89

В табл. 2 приведены результаты всех этих измерений. Для одной и той же меры результаты совпадают до нескольких сотых микрометра.

Таким образом, гелий-неоновые лазеры промышленного типа, стабилизированные даже по описанной выше сравнительно несложной схеме (без автоматической системы обратной связи), можно с успехом использовать для интерференционных измерений мер длины высших разрядов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Morokuma T., Nefflen K. F., Lawrence T. R. and Kluchet T. M. Interference fringes with long path difference using He—Ne Laser. *JOSA*, 1963, v. 53.
2. Baird K. M., Smith D. S., Hanes G. R., and Tsune-Kane S. Characteristics of a simple-Mode He—Ne Laser. *Appl. Opt.*, 1965, v. 4, № 5.
3. White A. D. Frequency Stabilization of Gas Laser. *IEEE. J. Quant. Electr.*, 1965, v. QE-1, № 8.
4. Ирисова Н. А., Жаботинский М. Е., Веселаго В. Г. Стабилизация частоты трехсантиметрового клистрона с помощью спектральной линии. «Радиотехника», 1955, № 4.
5. Rowley W. R. and Wilson D. C. Wave-length stabilization of an optical maser. *Nature*, 1963, v. 4908.
6. Ефремов Ю. П. и Калинин Н. А. Измерения концевых мер длины с помощью гелий-неонового лазера. «Измерительная техника», 1966, № 5.
7. Mielenz K. D., Cook H. D., Gilliland K. E., Stephens R. B. Laser provides accurate length measurements. *NBS Techn. News Bull.*, 1965, v. 49, № 1.
8. Shimoda K. and Javan A. Stabilization of the He—Ne Maser on the Atomic Line Center. *Appl. Phys.*, 1965, v. 36, № 3, part 1.
9. Lamb W. E. Theory of Optical Maser. *Phys. Rev.*, 1964, v. 134, A 1429.
10. Волкова Е. А., Карташев А. И., Романова М. Ф. и Степанов В. С. Универсальный интерферометр системы ВНИИМ для измерения концевых мер и геодезических кварцевых жезлов до 1200 мм. «Труды ВНИИМ», вып. 26 (86). Машгиз, 1955.

Поступила в редакцию 15/IV 1966 г.

УДК 531.715.1

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ПЛОСКИМИ ЗЕРКАЛАМИ ДЛЯ СЧЕТА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОЛОС

Метод измерения длины счетом интерференционных полос, впервые осуществленный Майкельсоном в 1892—1893 гг., долгое время не находил практического применения из-за большой трудоемкости визуального наблюдения и счета полос. В настоящее время благодаря использованию средств фотоэлектрической регистрации и автоматического счета этот метод измерения линейных перемещений является наиболее перспективным.

Во ВНИИМ метод автоматического счета полос применяют на интерферометрах для поверки шкал [1, 2] и для измерения малых линейных перемещений [3].

Одной из важных проблем при создании интерферометров с подвижными зеркалами со счетом интерференционных полос является обеспечение прямолинейности перемещения зеркала.

Известны две классические схемы кинематики интерферометров для измерения длины перемещений (например, длины штриховых мер). В одной из схем подвижное зеркало жестко связано с кареткой, на которой расположена штриховая мера, в другой — с микроскопом для наблюдения штрихов меры. В первом случае зеркало перемещают на измеряемый интервал кареткой со штриховой мерой, во втором — кареткой с микроскопом.

Первая конструкция, как правило, позволяет осуществить кинематическую схему, при которой оси пучка лучей и шкалы расположены последовательно на одной линии измерения; для второй схемы характерно смещение осей — параллельное их расположение [4]. Однако смещение линий измерения в пределах размеров используемых полей информации и зеркал наблюдается иногда и в первой кинематической схеме.

Влияние непрямолинейности на результаты измерения зависит как от величины отклонений, так и от расположения линий измерения.

Длину d_n перемещения каретки с зеркалом при начальном и конечном отсчетах штрихов интервала L_m (рис. 1) определяют из соотношения

$$L_1 = d_n + L_2 \cos \alpha_2 + \Delta h_c \sin \alpha, \quad (1)$$

где L_1 и L_2 — расстояния от отражающей поверхности зеркала до оси микроскопа и начального штриха соответственно;

Δh_c — смещение центра зеркала относительно оси пучка лучей при наклоне каретки.

Из формулы (1) находят, что

$$d_n = L_m \cos \alpha + L_2 (1 - \cos \alpha) - \Delta h_c \sin \alpha,$$

так как $L_1 = L_2 + L_m \cos \alpha$.

Погрешность измерения длины перемещения каретки при малых углах наклона равна

$$\delta L_{h_c} = d_n - L_m - L_m \frac{\alpha^2}{2} + L_2 \frac{\alpha^2}{2} - \Delta h_c \alpha.$$

Величина Δh_c зависит от угла α и радиуса вращения центра зеркала R_c относительно некоторой оси, сопряженной с направляющими. При малых углах наклона

$$\Delta h_c \approx R_c \alpha \text{ и}$$

$$\delta L_{h_c} = \left(\frac{L_2 - L_m}{2} - R_c \right) \alpha^2.$$

Приведенные рассуждения относятся к случаю совпадения оси штриховой меры с осью пучка (центром зеркала). При этом погрешность, обусловленная непрямолинейностью перемещения каретки, пропорциональна α^2 и при малых значениях $L_2 - L_m$, R_c и α пренебрежимо мала.

При параллельном расположении пучка лучей и меры со смещением линий измерения на H (рис. 1, в) возникает дополнительная погрешность, равная $H \sin \alpha$; тогда общая погрешность от влияния непрямолинейности перемещения каретки с зеркалом при малых углах наклона α будет

$$\delta L_{H_c} = H \alpha + \left(\frac{L_2 - L_m}{2} - R_c \right) \alpha^2. \quad (2)$$

Погрешность первого порядка $H \alpha$ существенно влияет на результаты измерения даже при малых углах α . Достаточно сказать, что уже при отклонении от прямолинейности на 1° погрешность δL_{H_c} при $H_c = 100$ мм будет порядка 0,5 мкм.

Эти погрешности находятся в соответствии с классическим принципом Аббе, сформулированным применительно к компарирующим приборам, согласно которому для уменьшения погрешностей от влияния непрямолинейности перемещения поверяемая и исходная меры должны быть расположены на одной линии измерения.

В интерферометре с реверсивным счетом полос сдвиг фаз приводит к некоторым отклонениям от этого принципа. Преобразование светового потока электронной аппаратурой счета интерференционных полос происходит по двум каналам. Между каналами фазы электрических сигнала

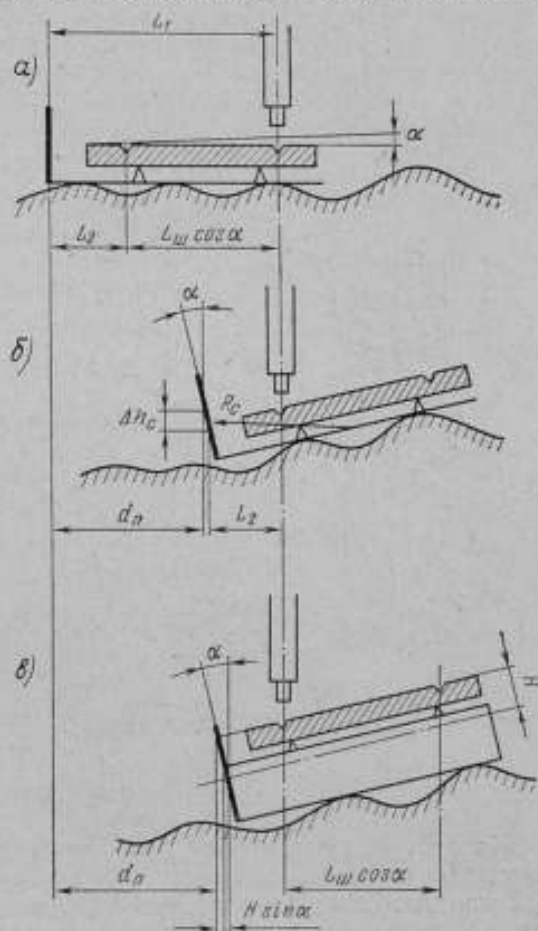


Рис. 1. Влияние непрямолинейности перемещения зеркала в интерферометре на результат измерения: а — при начальном, б и в — при конечном отсчетах штрихов.

дов сдвинуты на 90° смещением интерференционных картин, проецируемых через щели на фотоприемники, или смещением щелей.

Определенные соотношения размеров щелей и интерференционной полосы, необходимые для модуляции светового потока, и фазовый сдвиг сигналов для реверсивного счета обуславливают смещение полей информации интерферометра. Можно считать, что двухканальная система информации с взаимным смещением щелей приводит к смещению линий измерения и нарушению принципа Аббе. Это смещение линий зависит от размеров щелей, их расположения относительно интерференционной картины и параметров (угла клина, ширины полос).

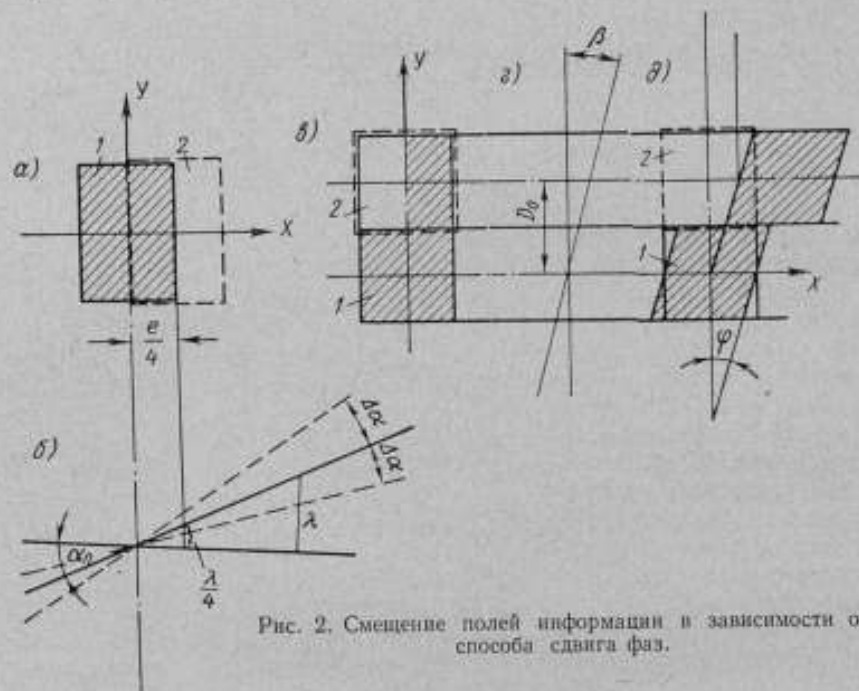


Рис. 2. Смещение полей информации в зависимости от способа сдвига фаз.

На рис. 2 показаны два способа сдвига фаз и соответствующие им смещения полей. Первый способ (а, б) обеспечивается смещением щелей 1 и 2 или изображений интерференционных картин, например поворотом зеркал, проецирующих интерференционную картину на щели [2]. Вторым способом (а, с, д) осуществляется смещением интерференционных картин на участках поля 1 и 2, проецируемых в каналы при введении дополнительной разности хода $\lambda/4$ (пластинки или слоя, перекрывающего часть светового диаметра).

Рассматриваемые поля соответствуют различным участкам основных зеркал интерферометра. В первом случае поля интерференции смещены на $e/4$ по оси X , во втором — по оси Y на D_0 .

Световой поток [5] от интерференционной картины, пропускаемый щелью, установленной параллельно полосам, при разности хода в центре щели δ_0 и на краях $\delta_0 \pm \Delta$ равен

$$F = \frac{2F_0}{\Delta} \int_{\delta_0 - \Delta}^{\delta_0 + \Delta} \cos^2 \frac{\pi \delta}{\lambda} d\delta$$

или

$$I = 2F_0 \left[1 + \cos \frac{2\pi\delta_0}{\lambda} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi\Delta}{\lambda}}{\frac{2\pi\Delta}{\lambda}} \right], \quad (3)$$

где F_0 — световой поток одного пучка через щель при отсутствии интерференции, зависящий от интенсивности источника и площади щели, а также от схемы интерферометра и наблюдаемой в нем разности хода.

Переменная составляющая светового потока является исходной информацией, преобразуемой в электрический сигнал, близкий к синусоидальному. Из этого сигнала формируются импульсы во время счета интерференционных полос.

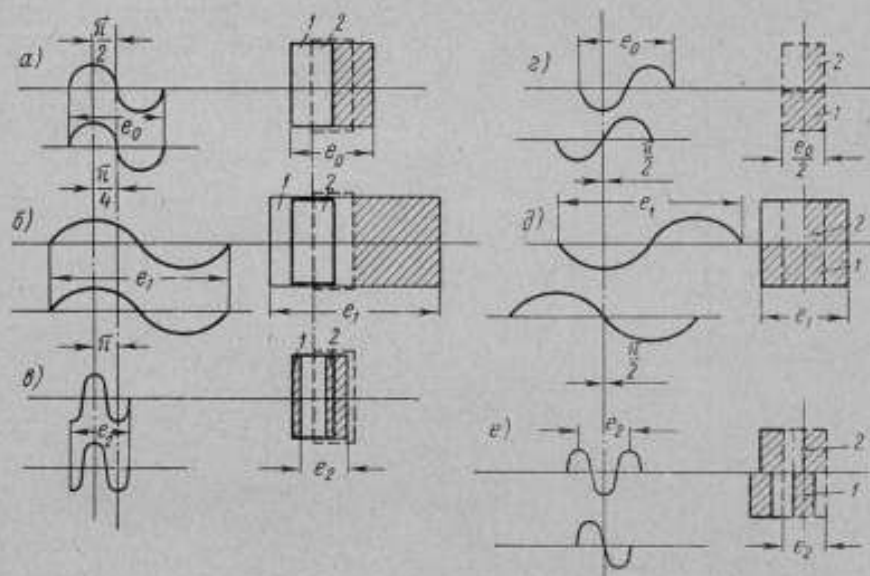


Рис. 3. Влияние изменения ширины полос на сдвиг фаз.

Фаза $2\pi\delta_0/\lambda$ светового потока, пропускаемого щелью, приблизительно соответствует фазе луча, проходящего через центр щели. Поэтому сдвиг фаз световых потоков $\Psi = \pi/2$ между щелями 1 и 2 определяется разностью хода $h_0\alpha_0 = \lambda/4$ (α_0 — начальный угол интерференционного клина). Расстояние h_0 между центрами щелей в пространстве предмета (зеркала) связано с расстоянием h в пространстве изображения зависимостью $h_0\Gamma = h$, где Γ — увеличение наблюдательной системы.

При непрямолинейном перемещении каретки длина хода лучей, падающих на различные участки зеркала, изменяется различно, что обуславливает изменение ширины и наклона полос. При изменении угла интерференционного клина $\Delta\alpha$ разность хода $\lambda/4$ между осями неподвижно установленных щелей 1 и 2 (рис. 2, а и б) изменяется на $h_0\Delta\alpha$.

Когда $h_0(\alpha_0 + \Delta\alpha) < \frac{\lambda}{4}$ и $h_0\Delta\alpha < 0$ (полосы расширяются, рис. 3, а, б), сдвиг фаз, полученный первым способом, уменьшается

$$\frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi h_0(\alpha_0 - \Delta\alpha)}{\lambda} < \frac{\pi}{2};$$

при $h_0(\alpha_0 + \Delta\alpha) > \frac{\lambda}{4}$ (ширина полос уменьшается, рис. 3, а, в) сдвиг фаз увеличивается

$$\frac{2\pi h(\alpha_0 + \Delta\alpha)}{\lambda} > \frac{\pi}{2}.$$

Начальный сдвиг фаз Ψ_0 световых потоков в каналах уменьшается до Ψ_1 при увеличении ширины полос от e_0 до e_1 и возрастает до Ψ_2 при уменьшении ее до e_2 (рис. 3, а, в):

$$e_1 > e_0 > e_2;$$

$$\Psi_1 < \Psi_0 < \Psi_2.$$

Для второго способа сдвига фаз разделение полей информации представлено на рис. 2 в, г, д и 3, г, д, е. При изменении ширины полос $e_2 < e_0 < e_1$ сдвиг фаз

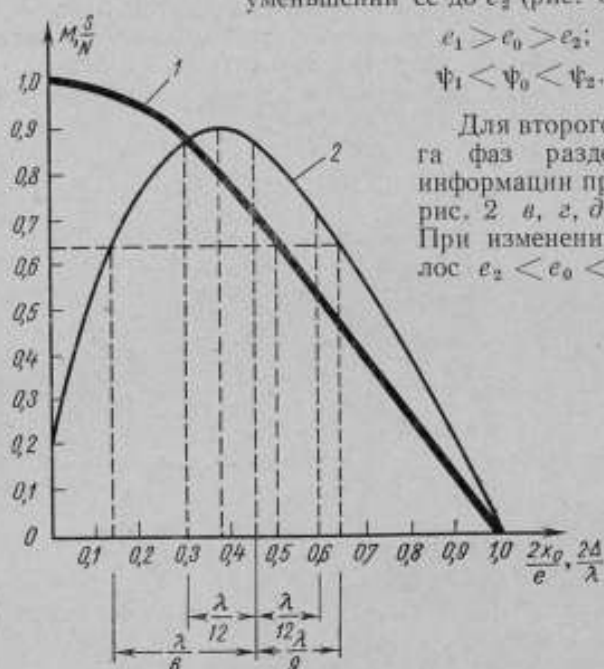


Рис. 4. Изменение глубины модуляции светового потока (1) и отношения сигнал — шум (2) от ширины щели и ширины полосы.

световых потоков Ψ на участках поля 1 и 2 остается постоянным и равен $\pi/2$. Однако при наклоне полос на угол φ , соответствующем наклону зеркала на угол β , сдвиг фаз изменяется на $D_0 \operatorname{tg} \varphi$ (D_0 — расстояние между центрами щелей 1 и 2, приведенное к пространству зеркала).

Таким образом, для обоих способов сдвига фаз в интерферометре с плоскими зеркалами при непрямолинейном перемещении каретки характерно нарушение начального фазового соотношения в каналах фотоэлектронной системы. Другим следствием наклона зеркал является изменение глубины модуляции M светового потока, от которой зависит амплитуда электрического сигнала:

$$M = \frac{\sin \frac{2\pi\Delta}{\lambda}}{\frac{2\pi\Delta}{\lambda}}.$$

Глубина модуляции M определяется контрастностью K интерференционной картины

$$K = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}},$$

в свою очередь зависящей от соотношения ширины полосы e_0 и ширины щели $2x_0$:

$$\frac{2x_0}{e_0} = \frac{2\Delta}{\lambda}.$$

График функции M представлен на рис. 4 (кривая 1).

При постоянной ширине щели $2x_0$ глубина модуляции достигает оптимального значения 0,64, когда $\sin \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = 1$; $\frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{\pi}{2}$ и $\Delta = \frac{\lambda}{4}$, т. е. когда ширина полосы равна удвоенной ширине щели. При соотношении $2\Delta \ll \lambda$ контрастность $K \rightarrow 1$.

Соотношение сигнал—шум S/N (кривая 2, рис. 4) также зависит от $2x_0/e_0$ или от $2\Delta/\lambda$. Выходной ток фотоумножителя пропорционален световому потоку.

Известно, что шум электронной аппаратуры пропорционален $\sqrt{I_{cp}}$ (I_{cp} — среднее значение тока). Поэтому [6]

$$\frac{S}{N} \propto \frac{I_{max} - I_{min}}{\sqrt{I_{cp}}}.$$

Преобразовав это выражение, получим

$$\frac{S}{N} \propto \frac{I_{max} - I_{min}}{\sqrt{\frac{I_{max} + I_{min}}{2}}} \sqrt{I_{cp}} = \frac{\sin \frac{2\pi\Delta}{\lambda}}{\frac{2\pi\Delta}{\lambda}} \sqrt{I_{cp}} = M \sqrt{I_{cp}}.$$

Но так как $I_{cp} \propto F_0$ и $F_0 \propto 2x_0$, то

$$\frac{S}{N} \propto \frac{\sin \frac{2\pi\Delta}{\lambda}}{\sqrt{\frac{2\pi\Delta}{\lambda}}}.$$

Максимальное значение S/N определяем из условия

$$\frac{d}{d\Delta} \left(\frac{\sin \frac{2\pi\Delta}{\lambda}}{\sqrt{\frac{2\pi\Delta}{\lambda}}} \right) = 0.$$

Обозначив $y = 2\pi\Delta/\lambda$, получим

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\sin y}{\sqrt{y}} \right) = \frac{2y \cos y - \sin y}{2y \sqrt{y}} = \frac{\cos y}{\sqrt{y}} - \frac{\sin y}{2y} = 0; \quad (4)$$

$$2y \cos y - \sin y = 0; \quad \frac{1}{2} \operatorname{tg} y = y.$$

Корни уравнения (4) соответствуют пересечению графиков двух функций: $x_1 = y$; $x_2 = \operatorname{tg} y$, откуда $y = 0,37$, т. е. значение S/N будет максимально в том случае, когда щель вырезает 0,37 полосы:

$$2\Delta = 0,37\lambda.$$

Таким образом, чтобы получить максимальное значение S/N и оптимальную глубину модуляции, соотношение ширины щели и ширины полосы следует принять в пределах 0,37—0,50. Область кривой, где изменяется $2x_0/e$ в пригодных для работы интерферометра и электронной аппаратуры пределах, можно рассматривать как область допустимых отклонений от прямолинейности перемещения. При работе электронной аппаратуры изменение сдвига фаз не должно превышать $\pm \pi/6$, что соответствует изменению разности хода $\pm \lambda/12$. Поэтому область допускаемых

изменений ширины полос относительно среднего значения $2\Delta/\lambda \approx 0,44$ определяем из соотношения $0,29 < \frac{2\Delta}{\lambda} < 0,61$ или $0,3 < \frac{2x_0}{e_0} < 0,6$.

Для обеспечения сдвига фаз и надежной работы электронной аппаратуры изменение ширины полос ограничивают соотношением

$$0,3 < \frac{2x_0}{e_0 + \Delta e} < 0,6; \quad \frac{2x_0}{0,3e_0} \geq \frac{e_0 + \Delta e}{e_0} \geq \frac{2x_0}{0,6e_0};$$

$$1,5e_0 \geq e_0 + \Delta e \geq 0,7e_0;$$

и пределы изменения угла клина ограничивают условием

$$1,5\alpha_0 \geq \alpha_0 + \Delta\alpha \geq 0,7\alpha_0.$$

В этом случае может быть допущено возрастание угла клина в 1,3 раза или уменьшение в 1,5 раза в соответствии с уменьшением ширины полос в 1,3 раза или увеличением в 1,5 раза относительно начальных значений

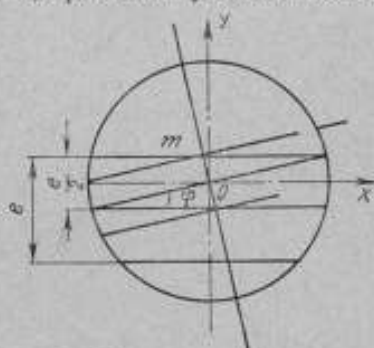


Рис. 5. Наклон интерференционной полосы относительно щели.

(цель выделяет 0,44 порядка интерференции, и начальный сдвиг фаз световых сигналов на щелях составляет $\pm \pi/2$). Ограничение угла наклона полос при этом способе сдвига фаз основано на сохранении глубины модуляции светового потока для надежной работы аппаратуры. Уменьшение сигнала вследствие изменения глубины модуляции происходит от изменения не только ширины, но и наклона интерференционных полос. Наклон полос на угол φ (рис. 5), возникающий от наклона зеркала относительно оси OY , приводит к разности хода вдоль оси OX на краях щели длиной m .

При положении щели, параллельном интерференционным полосам,

$$\frac{\partial F}{\partial x} = 0; \quad F_x = \text{const.}$$

При наклоне полос относительно щели на угол φ

$$\frac{\partial F}{\partial x} \neq 0.$$

Распределение амплитуд колебаний светового потока, определяющих глубину модуляции, может быть представлено в виде

$$M = M_1 M_2 = \frac{\sin \frac{2\pi x_0 \cos \varphi}{e}}{2\pi x_0 \cos \varphi} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi m \sin \varphi}{e}}{2\pi m \sin \varphi},$$

где M_1 определяет изменение глубины модуляции при расширении полос, так как $\frac{e}{\cos \varphi} > e$, а M_2 можно рассматривать как коэффициент изменения глубины модуляции за счет изменения ширины щели.

Пусть $m \sin \varphi$ — переменная ширина щели. Если $\varphi \rightarrow 0$, то $m \sin \varphi > 0$. С возрастанием φ убывает M_2 . При условии $1 \geq M_2 \geq 0,7$ ($\sim 0,64$) разность хода на длине щели m изменится на $\lambda/4$ или ширина щели изменится от бесконечно малой до оптимальной. Допустимый угол наклона полос определим из условия $\varphi < 2 \arcsin \frac{2x_0}{m}$, а соответствующий ему

угол наклона зеркала, вызывающий наклон интерференционных полос, будет равен $\beta = \lambda/4D$. Для $D = 40$ мм имеем $\beta = \pm 0,8^\circ$.

При втором способе сдвига фаз для $1 > M_s > 0,7$ получим область допустимых изменений ширины полос $0,14 < 2\Delta/\lambda < 0,64$. Увеличение ширины полос приводит к возрастанию глубины модуляции $M \rightarrow 1$ при $2\Delta/\lambda \rightarrow 0$ (аналогично случаю бесконечно узкой щели). Ограничением изменения ширины полос в этой части кривой 2 (рис. 4) является резкое возрастание влияния шумов (падение S/N). С уменьшением ϵ наблюдается одновременное падение S/N и глубины модуляции светового потока, а следовательно, и сигнала, что значительно уменьшает допустимое сужение полос.

Пределы изменения ширины полос:

$$0,14 < \frac{2\alpha_0}{\epsilon_0 + \Delta\epsilon} < 0,64;$$

$$3,2\epsilon_0 \geq \epsilon_0 + \Delta\epsilon \geq 0,7\epsilon_0.$$

Так как $\Delta\alpha \approx 1/\Delta\epsilon$, то допустимые изменения угла клина, при которых еще может быть осуществлен счет, будут

$$3,2\alpha_0 < \alpha_0 + \Delta\alpha < 0,7\alpha_0.$$

В данном случае может быть допущено увеличение угла клина и уменьшение ширины полос в 1,3 раза или уменьшение угла клина и увеличение ширины полос в 3,2 раза. Это условие соответствует разности хода между каналами

$$\frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda}{6} < \delta + \Delta\delta < \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{9};$$

$$\frac{\lambda}{12} < \delta + \Delta\delta < \frac{13}{36}\lambda$$

и допускает ее изменение на $\lambda/6$ при расширении полос и на $\lambda/9$ — при сужении. Наклон зеркала на угол β , вызывающий наклон интерференционных полос на угол φ , ограничивается соотношением

$$D_0 \operatorname{tg} \varphi < \frac{\epsilon}{12}.$$

Так как ширина полос при наклоне на угол φ также изменяется, $\epsilon = \frac{\epsilon_0}{\cos \varphi}$, то

$$\sin \varphi < \frac{\epsilon_0}{12H}.$$

Допустимый угол φ пропорционален ширине полос и обратно пропорционален длине щели. Тогда $\beta < \epsilon_0 \alpha_0 / 12D_0$, а так как $\epsilon_0 \alpha_0 \approx \text{const}$ при малых углах клина, то $\beta < \text{const}/D_0$. Следовательно, допустимый угол β не зависит от ширины полос и угла клина; он определяется длиной щели, характеризующей величину D_0 .

Понятие «непрямолинейность перемещения» при счете полос включает в себя последовательные наклоны зеркала, обусловленные дефектами направляющих, влиянием механизма подачи, привода, вибраций и других факторов статического и динамического характера.

В интерферометре с плоскими зеркалами и полосами равной толщины целесообразно применять первый способ сдвига фаз. Как следует из приведенных выше соотношений, допустимое отклонение от прямолинейности тем больше, чем больше угол первоначального клина и чем меньше поле интерференции, с которого снимают информацию для преобразова-

ния в электрический сигнал. Уменьшение поля интерференции позволяет обеспечить условия счета в случае отклонений от прямолинейности, практически достижимой при современном состоянии технологии изготовления направляющих.

Уменьшение используемого поля интерференции, ограничивающее влияние непрямолинейного перемещения и других механических факторов, с одной стороны, позволяет расширить допустимые отклонения от прямолинейности, а с другой — приводит к уменьшению светового потока $2F_0$, поступающего из интерферометра. Последнее обусловлено уменьшением площади щелей (3). Поэтому осуществление счета полос в интерферометре с плоскими зеркалами при уменьшенных полях зависит от интенсивности источника света, чувствительности и усиления сигнала электронной аппаратурой. При малой интенсивности источника и используемой апертуре зеркал возникает необходимость усиления сигнала электронной аппаратурой или применения оптических схем с большим световым потоком.

Погрешность δL_{H_c} от непрямолинейности перемещения при реверсивном счете интерференционных полос (2) с учетом влияния сдвига фаз определяют по формуле

$$\delta L_{H_c} = L_2 \frac{\Delta\alpha^2}{2} + L_3 \frac{\Delta\alpha^2}{2} + \Delta h_c \sin \Delta\alpha + H \sin \Delta\alpha + h_\psi \sin \Delta\alpha + \sum h_{\psi_i} \sin \Delta\alpha_i, \quad (5)$$

где h_ψ — смещение каналов информации, зависящее от способа сдвига фаз;

$h_{\psi_i} \sin \Delta\alpha_i$ — погрешность от влияния динамических факторов и вибраций.

Когда ось светового диаметра пучка совпадает с осью шкалы (принцип Аббе выполняется), вместо погрешности $H \sin \Delta\alpha$ возникает погрешность $H_0 \sin \Delta\alpha$, где H_0 определяет неточность совмещения линии измерения интерферометра и оси шкалы.

Оценим погрешность от влияния непрямолинейности. Радиус вращения зеркала каретки равен

$$R_c = \sqrt{\frac{L_{ct}^2}{4} + H_{ct}^2},$$

где L_{ct} и H_{ct} — длина и высота стола.

В интерферометре для шкал [1] $L_{ct} = 300$ мм, $H_{ct} = 70$ мм, $L \ll 200$ мм и $L_3 \approx 50$ мм. Предполагая непрямолинейность перемещения $\Delta\alpha = \pm 5''$, можно заключить, что первые три составляющие погрешности (5) пренебрежимо малы.

Оси пучка и шкалы совмещают на глаз, при этом $H_0 \geq 0,5$ мм. Погрешность от несовмещения линий измерения может достигать $H_0 \sin \Delta\alpha = \pm 0,02$ мкм. Поэтому для высокоточных измерений следует тщательно устанавливать поверяемую меру по высоте.

Погрешности $h_\psi \sin \Delta\alpha + \sum h_{\psi_i} \sin \Delta\alpha_i \approx h_\psi \Delta\alpha + \sum h_{\psi_i} \Delta\alpha_i$ обусловлены способом сдвига фаз. Первая зависит от систематического отклонения от прямолинейности на данном интервале; вторая — от мгновенных случайных отклонений, вибраций, накапливающихся в процессе перемещения из-за влияния динамических факторов.

Смещение полей информации и положение щелей относительно интерференционной картины ограничивают возможную погрешность измере-

ния длины условиями осуществления счета, которые для первого способа сдвига фаз будут

$$h_{\varphi} \sin \Delta \alpha + \sum h_{\varphi_i} \sin \Delta \alpha_i < \frac{\lambda}{12}.$$

Величина h_{φ} при смещении щелей относительно одной и той же полосы равна

$$h_{\varphi} = \frac{e_0}{4} = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha_0} \approx \frac{\lambda}{2 \alpha_0},$$

а при смещении щелей относительно друг друга на $k + 1/4$ полос или при k щелевых диафрагмах

$$h_{\varphi} = \frac{(4k + 1) e_0}{4} \approx \frac{(4k + 1) \lambda}{2 \alpha_0}.$$

Для второго способа сдвига фаз возникает также погрешность из-за наклона полос, обуславливающего изменение сдвига фаз:

$$\sum D_0 \sin \Delta \beta + \sum D_0 \varphi_i \sin \Delta \beta < \frac{\lambda}{12}.$$

Таким образом, в интерферометре с плоскими зеркалами и реверсивным счетом интерференционных полос, погрешности от непрямолиней-

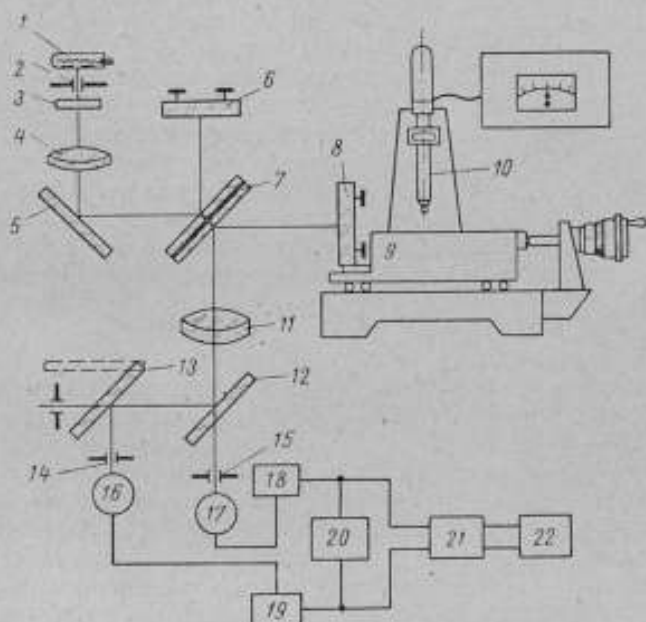


Рис. 6. Схема интерферометра для измерения линейных перемещений счетом интерференционных полос.

ности перемещений, связанные с изменениями фазового соотношения между каналами информации, не превосходят $\pm \lambda/12 \approx 0,045$ мкм.

Приведенные выше соображения позволили осуществить метод измерения длины счетом интерференционных полос в двух интерферометрах с плоскими зеркалами.

Интерферометр для измерения линейных перемещений может быть использован в качестве приставки к измерительным приборам. В случае применения в инструментальном микроскопе (рис. 6) его укрепляют с левой стороны корпуса прибора. Источник света 1 (ртутная лампа, изготов-

ленная на заводе «Эталон») с параллельным пучком через щель 2, светофильтр 3, объектив 4 и вспомогательное зеркало 5 освещает разделяющую пластину 7. Относительное зеркало 6 установлено в регулируемой оправе, жестко связанной с остальными деталями интерферометра, а зеркало 8 — с подвижной кареткой 9 микроскопа. Интерференционная картина полос равной толщины проецируется объективом 11 через полупрозрачное зеркало 12 и зеркало 13 на щели 14 и 15, находящиеся перед фотокатодами фотоэлектронных умножителей 16 и 17.

При перемещении каретки с зеркалом в интерферометре изменяются разность хода лучей и фаза светового потока, что приводит к изменению освещенности в каждой точке поля наблюдательной системы. Пройдя через щели 14 и 15, световой поток модулируется и поступает на фотоприемники ФЭУ-32. Электронная аппаратура [2] преобразует синусоидальные колебания потока в дискретно-цифровую форму информации с числом импульсов, равным числу полуволн, укладывающихся в длине перемещения каретки. Преобразование выполняют по блок-схеме (рис. 6), которая состоит из фотоумножителей 16 и 17, усилителей 18 и 19, схемы формирования импульсов 21 и реверсивного счетчика интерференционных полос 22. Дробные части порядка интерференции оценивают по индикатору 20.

Сдвига фаз световых потоков достигают смещением изображения интерференционной картины на щели 14 относительно щели 15. Для этого зеркало 13 наклоняют, поворачивая ось его оправы рычагом, выведенным на корпус прибора. Зеркало 8 устанавливают перпендикулярно к направлению перемещения каретки.

Для информации использовали поле интерференции 5×5 мм (в пространстве предмета), что позволило применить в данном интерферометре разделяющий блок и узел относительного зеркала прибора типа ИКП, серийно выпускаемого промышленностью. Исходя из ранее указанных требований к сдвигу фаз, в данном случае при $\lambda = 0,56$ мкм может быть допущена непрямолинейность $\Delta\alpha$ перемещения каретки

$$h\Delta\alpha < \frac{\lambda}{12}; \quad \Delta\alpha < \frac{0,28 \cdot 10^{-3}}{2,5 \cdot 12} \text{ рад} \approx 2''.$$

Отклонения от прямолинейности направляющих инструментальных микроскопов, согласно ГОСТ 8074—56, не должны превышать в линейных единицах 0,002—0,003 мкм.

Эти требования выполняются при контроле прямолинейности методом с нивелированием крайних точек хода. Отклонения от прямолинейности перемещения каретки находящиеся в эксплуатации микроскопов, как правило, превышают допустимые. Однако, как показали исследования направляющих нескольких приборов, изменения этих отклонений имеют плавный характер и на длине перемещения 10 мм не превышают $1''$.

Вследствие влияния характера движения, динамических факторов, вызывающих изменение сдвига фаз в процессе движения, необходимо предусматривать некоторый коэффициент запаса отклонений от прямолинейности. В данном случае этот коэффициент был приблизительно равен двум. Динамическая непрямолинейность каретки инструментального микроскопа обусловлена ее «качкой» из-за воздействия сил трения, натяжения пружин и моментов сил, возникающих вследствие несовпадения плоскости направляющих с линией подачи от микровинта.

Наклоны каретки с зеркалом приводят к изменению ориентации интерференционной картины относительно щелей и к падению сигнала или нарушению сдвига фаз. Влияние динамических факторов проявлялось в изменении величины сигнала при неподвижной и подвижной каретке,

а также в изменении сдвига фаз от направления перемещения и пр. Для каретки поперечного хода, у которой плоскость движения совпадает с осью подачи, падения сигнала в начальный момент движения не наблюдалось.

Пределы осуществления счета интерференционных полос в описываемом интерферометре определяются когерентностью и интенсивностью источника, а также характером перемещения каретки. Счет полос на установке (рис. 7) с интерферометром осуществлен при перемещении каретки на 8—10 мм со скоростью 250—300 имп/сек. Наведение на штрих производят по фотоэлектрическому микроскопу 10 (рис. 6) [7].

Реверсивный счет интерференционных полос осуществлен также на интерферометре для шкал с плоскими зеркалами [1]. Результаты измерений длины при использовании источника света ^{198}Hg приведены в работе [2].

В описываемых экспериментах в качестве источника был применен гелий-неоновый лазер ОКТ-11. Высокая интенсивность источника позволила ограничить поле информации интерферометра до 2×2 мм по сравнению с экспериментами в монохроматическом свете изотопа ^{198}Hg [2], в которых для обеспечения сигнала использовали поле 45×7 мм. Благодаря ограничению поля интерференции уменьшена чувствительность интерферометра к наклонам плоских зеркал, что вместе с высокой интенсивностью и когерентностью источника дало возможность осуществить счет интерференционных полос в пределах до 200 мм.

В установке для измерения линейных перемещений (рис. 7) световой поток преобразовывали в электрические сигналы с помощью фотоэлектронных умножителей ФЭУ-32, а в интерферометре для шкал с лазером — с помощью ФЭУ-27. Соотношение интенсивности световых потоков от интерферометра с источниками ^{198}Hg и лазером ОКТ-11 можно оценить приблизительно как 1 : 300. Оно было определено по сигналам на экране катодно-лучевой трубки с учетом зависимости сигнала от напряжения питания фотоэлектронных умножителей, различной спектральной чувствительности фотокатодов к линиям ртути ($\lambda = 0,5461$ мкм) и лазера ($\lambda = 0,6328$ мкм), а также от площадей модулирующих световой поток диафрагм. Соотношение интенсивности световых потоков от интерферометра с источниками — ртутной лампой высокого давления и лазером может быть оценено как 1 : 30.

В экспериментах с лазером на интерферометре для шкал использовали узкий пучок света диаметром 4—5 мм. Ширина полос в пространстве

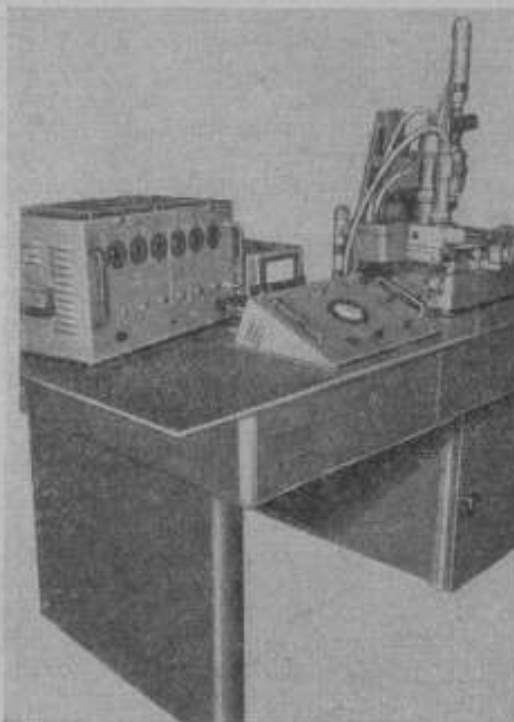


Рис. 7. Установка для измерения линейных перемещений счетом интерференционных полос.

предметов составляла 2 мк, что позволило рассчитать допускаемые отклонения Δz от прямолинейности (при $\lambda = 0,316$ мкм), приблизительно равные 5".

Эти условия при шариковых направляющих позволяют осуществить счет на большой длине перемещения каретки (например, в интерферометре для шкал — до 200 мкм). Отклонения от прямолинейности для статических положений каретки — около 7". Поэтому падение сигналов при нарушении параллельности полос и щели или соотношения ширины щели и полосы, а также отклонения, обусловленные влиянием привода, ограничивают коэффициент запаса в пределах 1,5. Высокая интенсивность источника обеспечивает необходимый для фотоэлектронной аппаратуры сигнал при малых полях информации, для которых допустимы большие отклонения от прямолинейности перемещения зеркала и шумы.

Перед измерением включенный лазер выдерживали около 1—2 ч для стабилизации температурного режима. В процессе измерения нестабильность постоянной составляющей светового потока компенсировали с помощью потенциометра индикатора дробной части интерференционной полосы ИДИП [2]. Критерием при регулировке являлось симметричное положение описываемой световым пятном окружности относительно центра электронно-лучевой трубки.

При измерении интервала шкалы L_m определяли целое число N и дробную часть ϵ порядка интерференции, заключенные в длине перемещения каретки:

$$L_m = (N + \epsilon) \frac{\lambda}{2},$$

где $\lambda = 0,63281968$ мкм — длина волны гелий-неонового лазера, определенной в режиме с одной модой*; в данном случае это значение λ было принято равным среднему значению длин волн, излучаемых в режиме с несколькими модами.

Показания N снимали по реверсивному счетчику импульсов с дискретностью счета $\lambda/2$. Значение ϵ не могло быть точно определено по индикатору ИДИП вследствие изменения сдвига фаз сигналов в каналах фотоэлектронных умножителей, приводящего к искажению траектории движения светового пятна на экране электронно-лучевой трубки при наклонах плоских зеркал. Поэтому для оценки дробных частей применяли шкалу индикатора фотоэлектрического микроскопа [7]. Отклонение стрелки индикатора обусловлено синусоидальным сигналом фотоэлектронного преобразователя от светового потока, модулируемого щелью, вибрирующей относительно изображения штриха. При амплитуде колебания щели, равной половине ширины штриха (4—5 мкм), для оценки $\epsilon < 0,3$ мкм использовали 0,03 участка синусоиды, на котором зависимость показаний прибора от смещения штриха относительно оси микроскопа линейна. Градуировка шкалы подтвердила линейность этой зависимости в пределах 0,005 мкм.

Чтобы исключить влияние изменения освещенности и качества штрихов в пределах одной и той же шкалы, приводящих к изменению чувствительности индикатора фотоэлектрического микроскопа, применяли следующую методику оценки ϵ . При малых смещениях штриха определяли отклонения n и m стрелки индикатора от нулевого положения в обе стороны; на реверсивном счетчике появлялись импульсы увеличения и уменьшения измеряемой длины. Критерием установки штриха в положение, соответствующее точке перехода с одного импульса на другой, являлось

* См. стр. 46

фотометрическое равенство светимостей катодов декастронов для двух последовательных импульсов. Дробную часть определяли из выражения

$$\varepsilon = \frac{m}{n+m}.$$

Были измерены сантиметровые интервалы стеклянной шкалы № 570760 для двух оптических схем — с плоскими зеркалами и с триэдрами. Среднее расхождение результатов десятикратных измерений для обеих схем равно 0,04 мкм, а наибольшее 0,09 мкм (см. таблицу). Разброс результатов отдельных измерений находился в пределах 0,2—0,3 мкм. Полученные данные для обеих схем не имеют систематических расхождений и поэтому являются подтверждением правильности приведенных выше соображений о погрешностях, связанных с изменением сдвига фаз.

Интервалы шкалы, мм	Отклонения интервалов шкалы для оптических схем, мкм		Расхождение результатов
	с плоскими зеркалами	с триэдрами	
0—10	+0,10	+0,09	+0,01
0—20	-0,31	-0,24	-0,07
0—30	-0,12	-0,11	-0,01
0—40	-0,44	-0,46	+0,02
0—50	-0,70	-0,73	+0,03
0—60	-1,06	-1,00	-0,06
0—70	-1,06	-1,01	-0,05
0—80	-1,55	-1,46	-0,09
0—90	-1,34	-1,40	+0,06
0—100	-2,12	-2,08	-0,04

Таким образом, в интерферометре с плоскими зеркалами с реверсивным счетом интерференционных полос помимо обычных, присущих приборам для линейных измерений погрешностей от непрямолинейности перемещений, возникают погрешности, связанные с изменением фазового соотношения между каналами информации.

Для надежной работы электронной аппаратуры изменение сдвига фаз допустимо в пределах $\pm \pi/6$, что соответствует изменению разности хода между каналами на $\pm \lambda/12$. Следовательно, погрешность измерения длины в этом случае, обусловленная изменением фазового соотношения, не превосходит $\lambda/12 \approx 0,045$ мкм.

Условия сохранения постоянства сдвига фаз являются весьма жесткими в отношении обеспечения требований к прямолинейности перемещения. Уменьшение поля интерференции, используемого для информации, позволяет расширить допустимые отклонения от прямолинейности и осуществить счет в условиях, реально достижимых с точки зрения технологии изготовления направляющих. Однако уменьшение поля информации приводит к уменьшению светового потока. Поэтому реверсивный счет интерференционных полос при малых полях может быть осуществлен при высокоинтенсивных источниках света или больших усилениях сигнала электронной аппаратурой.

В экспериментах со счетом полос в интерферометре с плоскими зеркалами была также установлена возможность использования нестабилизированного лазера ОКГ-11 для измерения длины перемещений 100—200 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимова Н. В. Интерференционный метод измерения штриховых мер длины. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (136). М.—Л., Стандартгиз, 1961.
2. Зорин Д. И., Трофимова Н. В., Шестопадов Ю. Н. Измерение длины штриховых мер счетом интерференционных полос. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
3. Трофимова Н. В. Интерферометр с плоскими зеркалами для измерений перемещений методом счета интерференционных полос. «Механизация и автоматизация изготовления шкал, сеток и лимбов к отсчетным устройствам», ч. 2. ЛДНТП, 1966.
4. Бржезинский М. Л. Интерференционные компараторы для штриховых мер. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
5. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М., Оборонгиз, 1953.
6. Coldberg J. and Brockman R. H. Interferometry in Length measurements «Electronic Technology», p. 1, 1962, April.
7. Бржезинский М. Л., Зорин Д. И., Сverdlichenko В. Д. Фотометрический фотоэлектрический микроскоп. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.

Поступила в редакцию 17/1 1967 г.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРОДОЛЬНЫЙ КОМПАРАТОР

В связи с широким распространением в промышленности штриховых мер длины и повышением требований к их точности в настоящее время стало необходимым создание высокоточных и высокопроизводительных методов и приборов для их поверки.

Метрологические оптико-механические компараторы служат для измерения длины метровых и дециметровых подразделений штриховых мер, для поверки же миллиметровых подразделений они мало приспособлены. Поверка миллиметровых подразделений на этих компараторах весьма трудоемка и ограничена относительно малой точностью измерений (погрешности достигают 0,5 мкм и более).

С целью повышения производительности поверки и точности результатов измерений во ВНИИМ разработан автоматический фотоэлектрический продольный компаратор. На этом приборе поверяют любые подразделения шкал штриховых мер длиной до 1 м методом продольного компарирования, сличая поверяемые интервалы с подразделениями образцовой штриховой меры длины с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа.

Этот метод измерений заключается в преобразовании измеряемой разности длин двух сличаемых мер в интервалы времени, которые могут быть весьма точно определены по частоте кварцевого генератора. Выполненные ранее исследования этого метода, обладающего высокой разрешающей способностью, дали положительные результаты, поэтому он и был применен при разработке данного компаратора.

Автоматический фотоэлектрический компаратор (рис. 1) состоит из станины с точными направляющими длиной 3 м; стола с двумя платформами, на которых устанавливаются образцовую и поверяемую меры; механизма подачи для перемещения стола на расстояние до 1050 мм; двойного фотоэлектрического микроскопа, обеспечивающего автоматическое наведение на штрихи и получение информации для измерительного устройства; электронного измерительного устройства и блока управления.

Сличаемые меры располагают на столе (длиной 1900 мм) компаратора по одной оси вдоль линии измерения. Такой способ расположения штриховых мер позволил исключить погрешности первого порядка вследствие непрямолинейного перемещения стола. Однако это повлекло за собой увеличение габаритов компаратора. Стол перемещается по направляющим на шарикоподшипниках и снабжен теплозащитным футляром. Платформы (длиной по 1100 мм) стола имеют специальные приспособления для регулировки положения сличаемых мер по высоте, длине и ази-

мату. Меры во время измерения лежат на роликовых опорах, установленных в точках Бесселя. Узел перемещения стола состоит из точного винта с шагом 1 мм, гайки и электропривода.

Конструкция примененного в данном компараторе двойного фотоэлектрического микроскопа несколько изменена по сравнению с описанной в работах [1, 2]. Тубусы микроскопа разнесены вдоль линии измерения на расстояние 1060 мм.

Оптическая схема двойного фотоэлектрического микроскопа (рис. 2) аналогична схеме сложного микроскопа, построенного по типу телескопических дуп. В его оптических каналах можно выделить объективы 3,

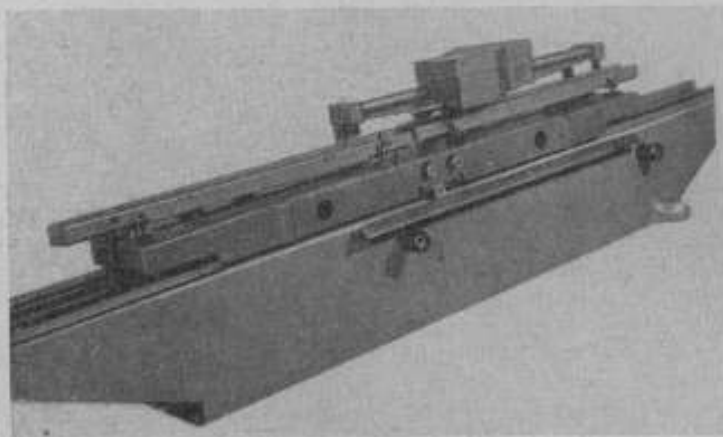


Рис. 1. Общий вид компаратора.

3' и зрительную трубу, состоящую из объективов 4, 4' и окуляров 8, 8'. Объективы 3 и 3' (серийные, типа ОС39) дают мнимое изображение штрихов мер 2 и 2', расположенных в их передней фокальной плоскости. Действительное изображение штрихов дают объективы 4 и 4' в задней фокальной плоскости (фокусное расстояние равно 250 мм), совпадающей с плоскостью регулируемых щелей 9 и 9'. Окуляры 8 и 8' служат для визуального наблюдения штрихов при установке мер. Увеличение микроскопа в плоскости промежуточного изображения $10\times$, а общее $40\times$.

Применение такой схемы микроскопа позволило исключить погрешности, вызываемые изменением увеличения оптических каналов, поскольку увеличение в плоскости щелей зависит только от отношения фокусных расстояний объективов микроскопа и зрительной трубы и не зависит от длины тубуса, которая может изменяться вследствие температурных либо иных воздействий. Для данного микроскопа значение высокочастотного импульса в линейной мере постоянно.

Сканирование изображений штрихов в плоскости щелей 9 и 9' производится электромагнитным вибратором, отличительной чертой которого является использование в колебательной системе плоскопараллельной пластины 10, покрытой с двух сторон алюминием. Колебания вибратора происходят в направлении, перпендикулярном к плоскости пластины, расположенной под углом около 25° к оптической оси микроскопа. Это позволило получить увеличенную амплитуду колебаний промежуточного изображения в плоскости щели, равную $A = 1,8a$ (a — амплитуда колебаний пластины). Кроме того, такая конструкция вибратора

повышает стабильность его колебаний и снижает износ пружин подвеса плоскопараллельной пластины.

Для проверки металлических штриховых мер в отраженном свете в микроскопе предусмотрены осветители 6 и $6'$. Пользуясь осветителями 1 и $1'$, можно проверять и стеклянные штриховые меры длиной до 500 мм. Наличие в оптических каналах плоскопараллельных пластин 5 и $5'$

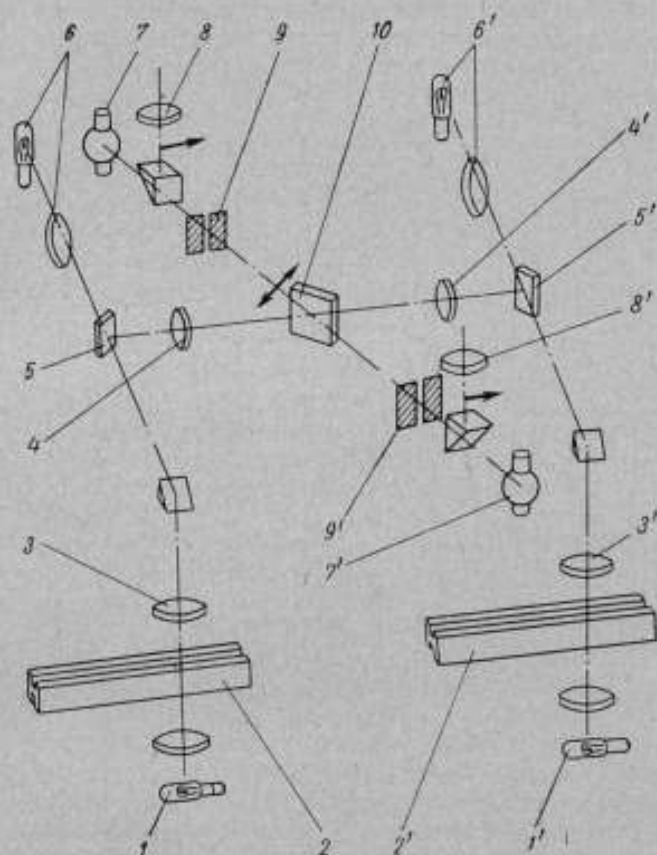


Рис. 2. Оптическая схема двойного фотоэлектрического микроскопа.

с 50%-ным алюминированием позволяет пользоваться той или иной системой осветителей без перестройки микроскопа.

Как известно, основным условием компарирования штриховых мер является неизменность длины компаратора во время измерения. Для выполнения этого условия корпус и тубусы двойного фотоэлектрического микроскопа изготовлены из инвара (температурный коэффициент удлинения $1 \cdot 10^{-6}$ м·град⁻¹). Микроскоп закреплен на кронштейне, который можно перемещать вдоль станины компаратора. В качестве преобразователей световых импульсов в электрические служат фотоэлементы СЦВ-3. В блоки фотопреобразования 7 и $7'$ кроме фотоэлементов входят предусилители и катодные повторители. Каждый блок соединен коаксиальным кабелем длиной 20 м с электронным измерительным устройством, благодаря чему последнее можно вынести в соседнее помещение.

Электронное измерительное устройство (рис. 3) состоит из блоков преобразования импульсов, их отбора и определения знака, реверсивного

счетчика с цифровой индикацией и блока управления. Импульсы с блоков фотопреобразования поступают в электронное измерительное устройство на усилители каналов 1 и 1' и далее на унивибраторы 2 и 2'. Затем прямоугольные импульсы дифференцируются цепочкой RC и после диодных ограничителей 3 и 3' импульсы длительностью в несколько микросекунд поступают на электронные ключи 4 и 4', которые открываются только в начале периода, соответствующего одному из максимальных отклонений вибратора, и закрываются в конце этого периода колебаний. В результате через каждый ключ проходит по 100 импульсов прямого и обратного ходов зеркала вибратора.

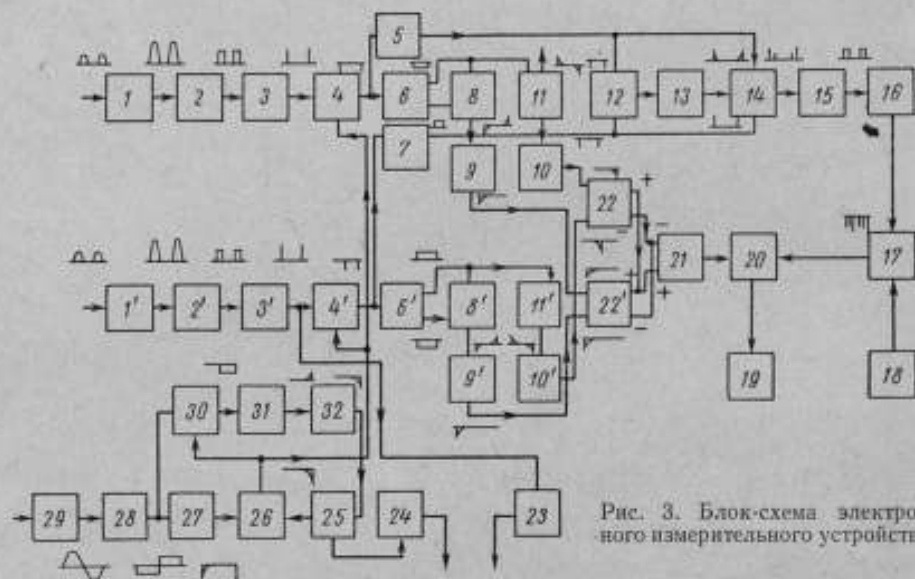


Рис. 3. Блок-схема электронного измерительного устройства.

Работа электронных ключей синхронизирована преобразованным напряжением вибратора. Синусоидальное напряжение с помощью фазовращателя 29, усилителя-ограничителя 28 и дифференцирующей цепочки с диодным ограничителем 27 преобразуется в отрицательные импульсы, соответствующие началу периода колебаний вибратора. Эти импульсы открывают электронный ключ 26, который в свою очередь открывает ключи 4, 4' (для прохождения импульсов от штрихов) и 30. Ключ 30 пропускает прямоугольные импульсы с усилителя-ограничителя 28, сдвинутые по фазе на 180° . Затем на дифференцирующей цепочке с диодным ограничителем 31 и инверторе 32 образуются отрицательные импульсы, которые подаются на счетчик 25 в конце каждого периода.

Таким образом, каждый период будет сосчитан только после того, как импульсы от штрихов, соответствующих прямому и обратному ходам вибратора, пройдут через электронные ключи 4 и 4'. Далее импульсы поступают на триггеры 6 и 6' и одновременно через линии задержки 5 и 7 — на схемы совпадений 12 и антисовпадений 14. Пройдя схему 14, они попадают в триггер 15. На выходе последнего образуются прямоугольные импульсы, пропорциональные разности длин интервалов между правыми краями (при прямом ходе зеркала вибратора) и между левыми краями штрихов образцовой и поверяемой мер (при обратном ходе). Эти импульсы затем поступают на катодный повторитель 16 и временной дискриминатор 17, который пропускает совпавшие с ними во времени высокочастотные

импульсы от кварцевого генератора 18. Число высокочастотных импульсов делится на два, так как окончательный результат измерения должен вычисляться как среднее из двух измерений (по правым и левым краям штрихов). Затем импульсы поступают на вход реверсивного счетчика 20, где происходит сложение или вычитание, в зависимости от знака измеряемой разности длин.

Знак разности определяют следующим образом. После дифференцирования прямоугольных импульсов с триггеров b и b' на элементах 8, $8'$ и 11, $11'$ и ограничения положительных выбросов на элементах 9 и $9'$ и 10, $10'$ отрицательные импульсы, соответствующие передним фронтам импульсов от левых краев штрихов, подаются на ячейку знака 22, а соответствующие передним фронтам импульсов от правых краев штрихов — на ячейку знака 22'. В зависимости от очередности прихода импульсов с каналов ячейка определяет знак временного интервала. Если первым приходит импульс от штриха поверяемой меры при движении зеркала вибратора в прямом направлении, то ячейка знака дает сигнал «плюс» и реверсивный счетчик суммирует поступающие на него высокочастотные импульсы. Если же первым приходит импульс от штриха образцовой меры, то ячейка дает сигнал «минус» и счетчик вычитает поступающие на него импульсы. При движении зеркала вибратора в обратном направлении сложение высокочастотных импульсов происходит, когда первым приходит импульс от штриха образцовой меры, а вычитание — от штриха поверяемой меры. Сигналы сложения или вычитания с ячеек 22 и 22' поступают на переключатель 21, который коммутирует счетчик 20 на сложение или вычитание.

По окончании одного периода колебаний ячейки знака возвращаются в исходное состояние отрицательными импульсами с инвертора 32. Таким образом, в конце каждого периода колебаний вибратора ячейки подготавливаются для определения знака временных интервалов при измерении разности длин в последующий период. Окончательный результат измерения с учетом знака отпечатывается на устройстве 19. Для измерения последующей разности длин команда на перемещение стола поступает с блока управления 24 от того же импульса. Для остановки стола компаратора в момент, когда изображение штриха пересекает щель соответствующего оптического канала, служит схема 23.

В случае нулевой разности длин интервалов между краями штрихов измеряемых подразделений импульсы на триггер 15 приходят одновременно и вызывают сбой триггера, и счетчик 20 покажет неверный результат. Для предотвращения этого в схему электронно-измерительного устройства введены блоки 12 и 13, которые закрывают схему антисовпадений 14, когда импульсы совпадают во времени (измеряемая разность равна нулю). Тогда импульсы от штрихов на триггер 15 не проходят и сбоя не происходит.

Время измерения разности длин сравниваемых интервалов при частоте колебаний вибратора 50 *гц* составляет 2 *сек*. Следовательно, на поверку миллиметровых интервалов шкалы меры длиной 1 м без учета времени перемещения стола компаратора необходимо затратить около 33 *мин*. Окончательный результат измерения каждой разности длин интервалов получают автоматически усредненным из 100 измерений, что уменьшает влияние шумов и повышает точность результата.

Температуру мер измеряют с помощью четырех медь-константановых термонпар (по две на каждую меру).

Предварительные исследования двойного фотоэлектрического микроскопа после юстировки показали, что различие увеличений обоих оптических каналов микроскопа не превышает 2%.

Собственная частота вибратора была 76 гц; амплитуда колебания изображения штриха составляла $A = 0,6$ мм при напряжении на вибраторе 14 в.

Экспериментально установлено также, что на участке 40 мкм развертки поверхности шкалы меры погрешность измерения, вызываемая изменением скорости развертки, не превышает погрешности из-за шумов фотоэлементов.

Значение высокочастотного импульса в линейной мере при 100-кратном усреднении измеряемой разности длин соответственно равнялось для первого и второго оптических каналов: $\gamma_1 = 0,00160$ и $\gamma_2 = 0,00163$ мкм. Для измеряемых разностей длин, не превышавших 10 мкм, наибольшая погрешность составляла $\pm 0,1$ мкм при погрешности автоматического совмещения штриха меры с осью каналов двойного фотоэлектрического микроскопа ± 5 мкм.

Результаты предварительного исследования показали правильность выбранной схемы и методики измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кляк Л. К., Торопин С. И., Тришин Н. В., Ячменцев О. В. Двойной фотоэлектрический микроскоп для компарирования подразделений штриховых мер длины. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138), М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
2. Тришин Н. В. Измерительное устройство к двойному фотоэлектрическому микроскопу. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138), М.—Л., Издательство стандартов, 1965.

Поступила в редакцию 1/III 1967 г.

УДК 531.715.1 : 535.825

ФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ К ДВУХЛУЧЕВЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРАМ

Интерференционные методы измерения различных физических величин, в частности длины, основаны на нахождении любым способом числа длин волн λ применяемого излучения, укладывающихся в измеряемой оптической разности хода. В общем случае это число не является целым и погрешность, с которой оно найдено, определяет точность измерения данной физической величины.

Существуют два определения [1, 2], согласно которым под порядком интерференции понимают: 1) число, равное разности хода, выраженной в длинах волн [1] и 2) номер полосы в интерференционной картине, которому можно приписать положительное или отрицательное значение (слева — справа, сверху — снизу), принимая в качестве начала отсчета нулевую интерференционную полосу [2].

В сущности, второе определение является частным случаем первого. Основной его недостаток — невозможность экспериментального определения нулевой интерференционной полосы в монохроматическом свете.

Методы нахождения порядка интерференции измеряемой разности хода можно разделить на две принципиально отличные группы: 1) методы, основанные на восприятии неподвижной интерференционной картины, и 2) на восприятии интерференционной картины в течение изменения данной разности хода.

В методах первой группы порядок интерференции не измеряют, а определяют по приблизительно известной длине, измеренной другими способами. Основные приемы методов первой группы сформулированы в работе [2].

В методах второй группы целый порядок интерференции регистрируют путем счета интерференционных полос, прошедших через приемник, расположенный в определенной части интерференционного поля, и приблизительно измерять длину другими способами не требуется.

Впервые методы визуального счета интерференционных полос разработал А. А. Майкельсон [3] и при осуществлении его применял следующие приемы:

- 1) установление нулевой разности хода в начале отсчета по интерференции в белом свете;
- 2) счет числа интерференционных полос в процессе изменения данной разности хода;
- 3) визуальное измерение дробной части интерференционной полосы в конце отсчета.

Отметим, что первый прием не характерен для данного метода. Если известны начало и конец отсчета, можно измерить дробные части интер-

ференционной полосы в эти моменты и результирующую дробную часть порядка интерференции получить как разность между конечным и начальным отсчетами.

Дальнейшее развитие метода счета интерференционных полос идет в двух направлениях. Создаются методы и средства автоматического счета числа интерференционных полос:

1) с использованием способов визуального измерения дробной части полосы. Это направление не решает основной метрологической задачи — повышения точности, ибо дробную часть полосы измеряют визуально;

2) с использованием радиоэлектроники для измерения дробной части полосы. Это направление позволяет повысить точность измерения порядка интерференции, а следовательно, и точность измерения физических величин.

Существенными достоинствами этого направления является возможность автоматизации процесса измерения как в статических, так и в динамических режимах.



Рис. 1. Общая структурная схема опико-электронного устройства для измерения порядка интерференции.

1 — оптический интерферометр; 2 — опико-электронный преобразователь интерференционных полос; 3 — усилитель электрических сигналов; 4 — формирователь; 5 — измеритель дробной части порядка интерференции; 6 — счетчик; 7 — регистрирующий прибор.

Метод измерения порядка интерференции основан на преобразовании светового сигнала от интерференционной картины в электрический с непрерывным получением нужной информации в течение изменения данной разности хода.

Общая структурная схема опико-электронного устройства для измерения порядка интерференции изображена на рис. 1.

Фотоэлектронная измерительная система регистрации интерференционных полос характеризуется трудоемкой обработкой регистрограмм, малым быстроедействием при точных измерениях больших разностей хода, появлением погрешности при изменении знака разности хода в процессе измерения. Такую измерительную систему рационально применять при интерференционных измерениях малых разностей хода (до 100λ), когда в процессе измерения знак разности хода не изменяется. Погрешность данного способа измерений составляет $0,01\lambda$.

Замена регистрирующего прибора 7 формирователем 4 [4] и счетчиком 6 дает возможность сделать вычисления порядка интерференции менее трудоемкими. Так как количество импульсов от интерференционных полос подсчитывает электронный счетчик, подобную систему можно было бы использовать для измерения больших разностей хода. Однако значительная погрешность измерения порядка интерференции ($0,25\lambda$) и, главное, зависимость последней от изменения знака разности хода в процессе измерения резко ограничили область применения этой системы.

Погрешность от изменения знака разности хода в процессе счета интерференционных полос исключается в двухканальной фотоэлектронной измерительной системе*. Сущность принципа построения этой системы состоит в том, что оптическими средствами интерференционная картина расщепляется на две картины, сдвинутые относительно друг друга на $0,25$ ширины изображения интерференционной полосы. Пучки света от каждой картины направляются на диафрагмы, установленные перед фотоэлектрическими преобразователями. С выхода последних снимаются два электрических сигнала, сдвинутых относительно друг друга на чет-

* Root-E. Патент США, 2.604.004, выданный в 1952 г.

верть периода. Сигналы после усиления поступают на вход формирователя 4 и измерителя дробной части порядка интерференции 5. Достаточно подробно этот принцип описан в работе [5].

Функциональная схема двухканального оптико-электронного устройства для измерения порядка интерференции (рис. 2) поясняет различные варианты построения электронных измерительных устройств. Одним из способов получения сдвинутых относительно друг друга интерференционных картин является расщепление выходного пучка интерферометра при помощи светоделителя. При таком способе разделения картин оптико-электронный преобразователь устройства состоит из светоделителя 6, диафрагм 7 и фотоэлектрических преобразователей 8. Формирователь 10 является двухканальной цепью, каждый канал которой состоит из одностабильных триггеров и схем совпадений. В зависимости от фазовых соотношений между входными сигналами, обусловленных знаком изменения разности хода, импульсы появляются только на одном из двух выходов формирователя 10, причем на одну интерференционную полосу вырабатывается один импульс. Далее импульсы поступают на реверсивный счетчик 11. При использовании аналогового способа измерения дробной части порядка интерференции с помощью электронно-лучевой трубки погрешность измерения составляет $0,01\lambda$ [6].

Существенного повышения точности измерения порядка интерференции достигают, применяя фотоэлектронную измерительную систему, работающую по компенсационному принципу [7]. Один из отражателей интерферометра (например, 4, рис. 2) закрепляют на калиброванном датчике линейного перемещения 5. В начале отсчета на датчик подают такой сигнал от источника компенсационного воздействия 14, чтобы разность потенциалов между выходными жакими усилителей 9 была равна нулю. Сигнал, подаваемый на датчик 5, измеряют прибором 13. После возвращения отражателя 4 в исходное положение целый порядок интерференции регистрируется реверсивным счетчиком. В конце отсчета процесс измерения дробной части порядка интерференции повторяют, и результат подсчитывают как разность между вторым и первым отсчетами. Согласно опубликованным данным [7] компенсационной фотоэлектронной измерительной системой можно измерять порядок интерференции с погрешностью $5 \cdot 10^{-4}\lambda$.

В практике линейных измерений, например при проверке подразделений штриховых мер, необходимо производить большое число измерений. В этом случае значительное время затрачивают на отсчет и запись показаний измерительных приборов. Для автоматической регистрации показаний реверсивного счетчика используют электрические цифрочечатающие

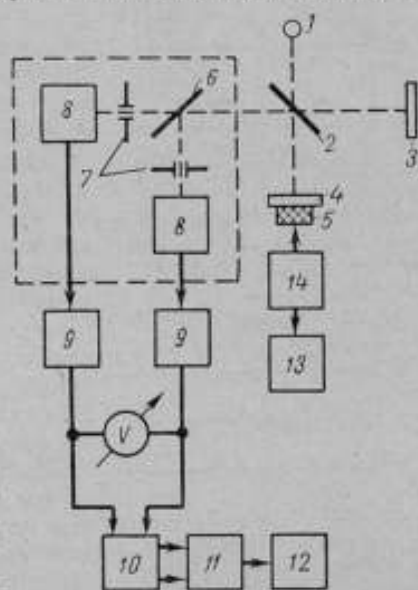


Рис. 2. Функциональная схема двухканального оптико-электронного устройства для измерения порядка интерференции.

1 — источник монохроматического света; 2 — разделительная пластинка; 3 — отражатель; 4 — отражатель; 5 — датчик линейного перемещения; 6 — светоделитель; 7 — диафрагмы; 8 — фотоэлектрические преобразователи; 9 — усилители постоянного тока; 10 — формирователь; 11 — реверсивный счетчик импульсов; 12 — регистрирующий прибор; 13 — прибор для измерения компенсационного воздействия; 14 — источник компенсационного воздействия.

машинки, а для автоматической регистрации дробных частей порядка интерференции разрабатывают специальные цифровые приборы.

Наиболее простым способом решения данной задачи является построение формирователя 10 таким образом, чтобы на каждую интерференционную полосу на его выходе вырабатывались два или четыре импульса.

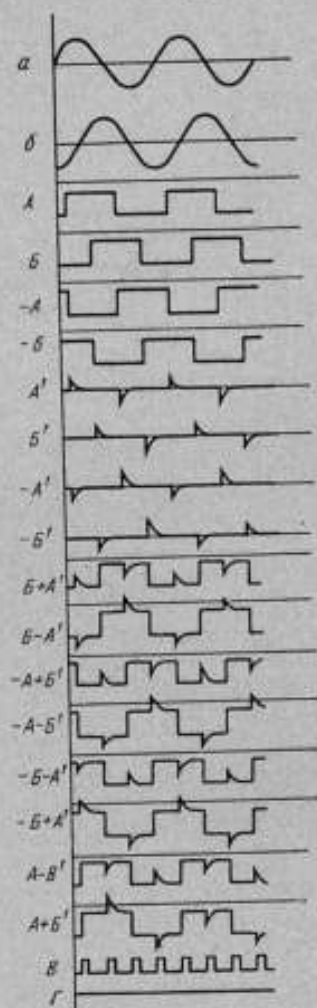


Рис. 3. Временные диаграммы сигналов формирователя, обеспечивающего четыре выходных импульса на одну интерференционную полосу.

разности хода до значения, при котором сработает цепь фиксации точки на полосе 14, электронный ключ закрывает доступ импульсов на вход счетчика. При заданной длительности импульсов на счетчике пропорционально дробной части порядка интерференции. После возвращения отражателя 4 в начальное положение целый порядок интерференции регистрируется реверсивным счетчиком. В конце отсчета описанный выше процесс измерения дробной части повторяют. Результирующий порядок интерференции

Во ВНИИМ разработаны и экспериментально опробованы такие формирователи. Принцип действия формирователя поясняет рис. 3, а принципиальная схема его изображена на рис. 4. Следует отметить, что подобный способ был применен фирмой «Лейтц» (ФРГ) в автоматическом интерференционном компараторе для измерения штриховых мер.

Фотоэлектронная измерительная система, опубликованная в работе [8], имеет специальный электронный цифровой прибор для измерения дробных частей порядка интерференции. Принцип измерения основан на преобразовании постоянных электрических сигналов, полученных на входе усилителей постоянного тока 9 (рис. 2), в переменные и выделении из них сигнала с фазовым углом, пропорциональным дробной части порядка интерференции. Сравнивая при помощи цифрового фазометра выделенный сигнал с опорным, получают значение дробной части порядка интерференции. Нелинейность электрических цепей преобразования постоянных электрических сигналов в переменные, в частности, не позволяет измерять дробную часть порядка интерференции с погрешностью менее $5 \cdot 10^{-3}\lambda$.

Во ВНИИМ разработан линейно-временной способ измерения дробной части порядка интерференции в цифровой форме. Сущность его состоит в том, что информация о дробной части преобразуется в интервал времени, измеряемый цифровым прибором. Принцип построения фотоэлектронной измерительной системы, реализующей этот способ, поясняет функциональная схема рис. 5. В начале отсчета на калиброванный датчик 5 подают от генератора 18 сигнал, который во времени изменяется по линейному закону. Одновременно формирователь 17 вырабатывает другой сигнал, который открывает электронный ключ 15. Счетчик 16 подсчитывает число периодов колебаний генератора стабильной частоты 13. При изменении

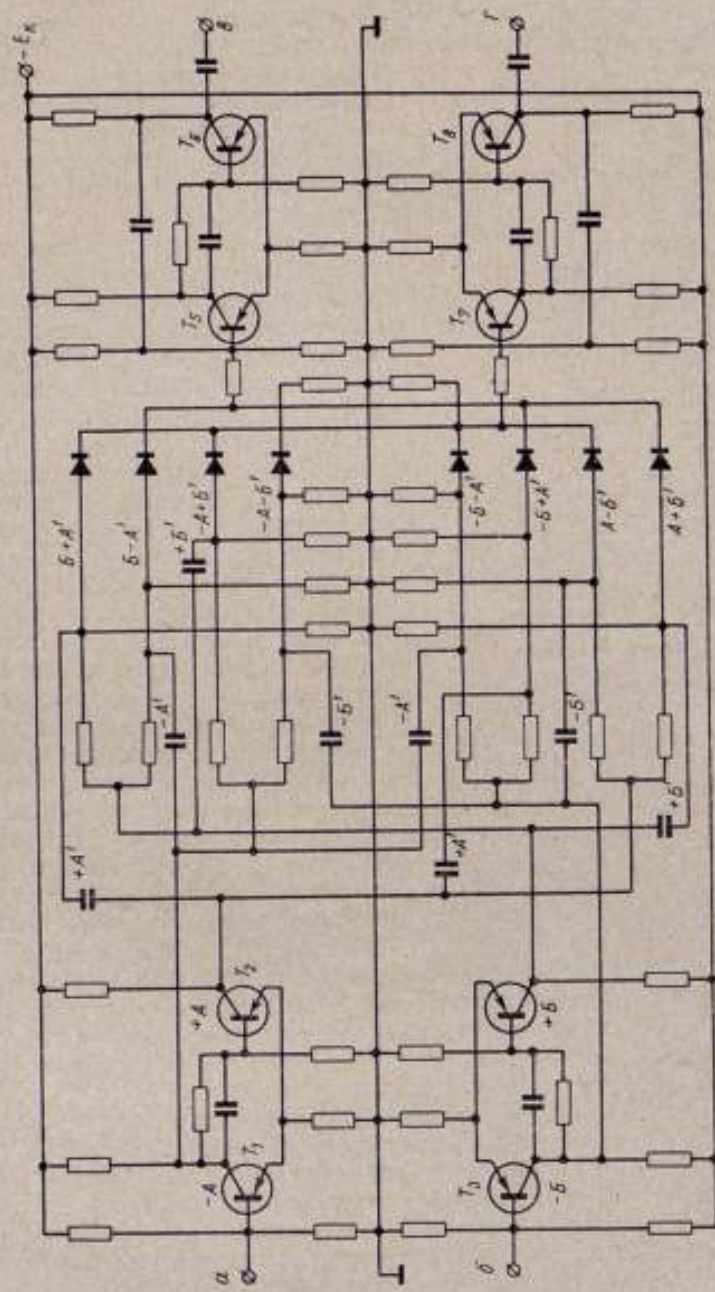


Рис. 4. Принципиальная схема формирователя, обеспечивающего четыре выходных импульса на одну интерференционную полосу.

на измеряемой разности хода вычисляют как разность между вторым и первым отсчетами. Теоретический анализ показал, что линейно-временным способом можно измерять порядок интерференции в цифровой форме с погрешностью $0,001\lambda$.

Экспериментальные исследования двухканальных фотоэлектронных измерительных систем на двухлучевом интерферометре показали [5], что они обладают двумя существенными недостатками:

1) зависимостью точности измерения от изменения постоянной составляющей светового сигнала и наличия дрейфа фотоэлектрических преобразователей с усилителями постоянного тока (УПТ);

2) необходимостью компенсации постоянной составляющей электрического сигнала на входе УПТ.

Приведенные выше погрешности фотоэлектронных измерительных систем являются методическими. Для достижения столь малых погрешностей измерения необходимо принять ряд мер для стабилизации светового потока и компенсации постоянной составляющей входного сигнала. К этим мерам относятся, в частности, стабилизация мощности, подводимой к источнику монохроматического света, и температурного режима источника, компенсация дрейфа фотоэлектрических преобразователей и усилителей постоянного тока.

Эффективным средством устранения указанных недостатков является построение фотоэлектронных систем с интерференционной модуляцией. В качестве интерференционного модулятора нужно выбирать элемент оптической схемы, который, обеспечивая изменение интенсивности света

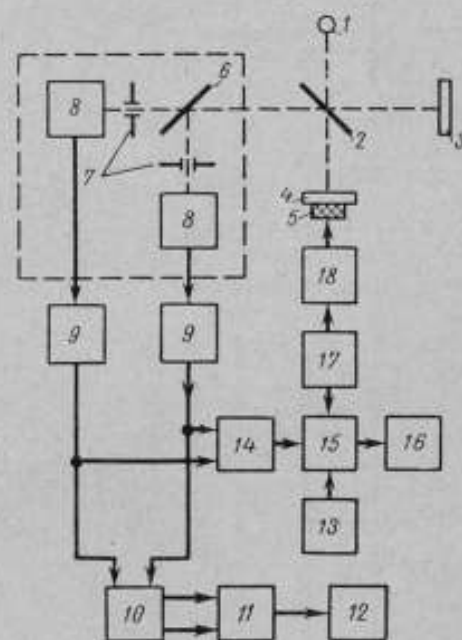


Рис. 5. Функциональная схема двухканального оптико-электронного устройства с линейно-временным способом измерения дробной части порядка интерференции.

Обозначения 1—12 приведены на рис. 2; 13 — генератор стабильной частоты; 14 — цепь фиксации точки на полосе; 15 — электронный ключ; 16 — счетчик; 17 — формирователь сигнала запуска; 18 — генератор линейного воздействия.

перед фотоэлектрическим преобразователем, не модулировал бы постоянную составляющую светового потока. Только в этом случае постоянная составляющая сигнала не пройдет через усилитель переменного тока в последующие цепи электронных устройств и тем самым не окажет влияния на точность работы измерительной системы.

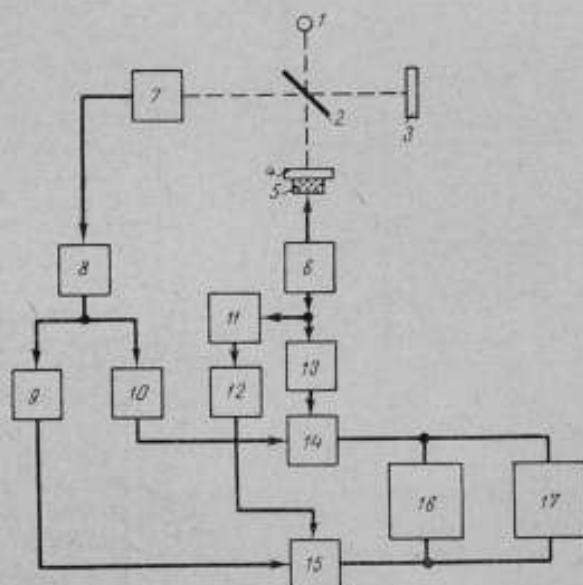
Известны два типа фотоэлектронных измерительных систем с интерференционной модуляцией: одноканальная и двухканальная.

Сущность принципа построения одноканальной измерительной системы [9] состоит в том, что модулированный световой поток преобразуется в электрический сигнал, из которого выделяются колебания первой и второй гармоник. Эти сигналы используют для получения информации о величине и знаке изменения разности хода. Функциональная схема одноканальной измерительной системы изображена на рис. 6. Интерференционный модулятор состоит из отражателя 4, закрепленного на датчике линейного перемещения 5, который приводится в колебание синусоидальным сигналом от источника 6. Модулированный световой поток преобра-

зуется в электрический сигнал фотоэлектрическим преобразователем 7 и усиливается усилителем переменного тока 8. Из модулированного электрического сигнала фильтрами 10 и 9 выделяются соответственно колебания первой и второй гармоник, которые поступают на входы балансных смесителей 14 и 15. На другие входы последних подаются сигналы первой гармоники от источника 6 через фазовращатель 13 и второй гармоники от удвоителя частоты 11 через фазовращатель 12. На выходах балансных смесителей получают два постоянных сигнала, если разность хода не меняется, и переменные сигналы, если она меняется. Тре-

Рис. 6. Функциональная схема одноканального оптико-электронного устройства с интерференционной модуляцией.

1 — источник монохроматического света; 2 — разделительная пластина; 3 — отражатель; 4 — отражатель; 5 — датчик линейного перемещения; 6 — источник синусоидальных колебаний; 7 — фотоэлектрический преобразователь; 8 — усилитель переменного тока; 9 — фильтр второй гармоники; 10 — фильтр первой гармоники; 11 — удвоитель частоты; 12 — фазовращатель; 13 — фазовращатель; 14 — балансный смеситель; 15 — балансный смеситель; 16 — счетчик; 17 — интерполитор полос.



буемый сдвиг на 90° фаз выходных сигналов, поступающих на счетчик 16 и интерполитор 17 (электронно-лучевая трубка), устанавливаются при помощи фазовращателей 12 и 13.

Сущность принципа построения двухканальной измерительной системы* состоит в том, что модулированный световой поток разделяется на два с фазовым сдвигом, приблизительно равным 90° , оба потока преобразуются в электрические сигналы, которые используются для получения информации о величине и знаке изменения разности хода лучей в интерферометре. Функциональная схема двухканальной измерительной системы изображена на рис. 7. Интерференционная модуляция осуществляется модулятором 4—5, питаемым источником модулирующих колебаний 13. Модулированный световой поток расщепляется на два при помощи разделительной пластины 6. Эти потоки направляются на щелевые диафрагмы 7, установленные перед фотоэлектрическими преобразователями 8. С выхода преобразователей электрические сигналы подаются на усилители переменного тока 9 и далее — на входы демодуляторов 10. На другие входы их поступают модулирующие колебания от источника 13. Требуемый сдвиг на 90° фазы сигналов, поступающих на реверсивный счетчик интерференционных полос 11 в интерполитор 12,

* Зорин Д. И., Шестопалов Ю. Н. Оптико-электронное устройство для измерения линейных размеров деталей. Авторское свидетельство № 194330, «Бюллетень изобретений», 1967, № 8.

устанавливают оптико-механическими элементами, например поворотом пластины *b* или смещением щелевых диафрагм *7*.

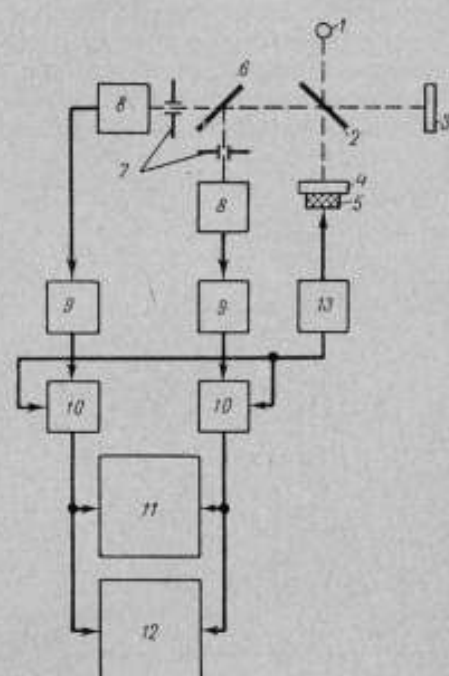


Рис. 7. Функциональная схема двухканального оптико-электронного устройства с интерференционной модуляцией.

Обозначения 1—5 приведены на рис. 6; *b* — разделительная пластина; 7 — диафрагма; 8 — фотоэлектрические преобразователи; 9 — усилители переменного тока; 10 — демодуляторы; 11 — реверсивный счетчик интерференционных полос; 12 — интерполатор полосы; 13 — источник модулирующих колебаний.

Принципиальными достоинствами фотоэлектронных измерительных систем с интерференционной модуляцией являются:

1) отсутствие необходимости компенсировать постоянную составляющую входного сигнала;

2) исключение погрешности, обусловленной изменениями этой составляющей;

3) возможность работы с меньшими сигналами, так как чувствительность усилителей переменного тока при равных условиях выше чувствительности усилителей постоянного тока.

Несмотря на эти достоинства фотоэлектронные системы с интерференционной модуляцией не получили распространения для реализации метода реверсивного счета интерференционных полос.

Рассмотренные фотоэлектронные измерительные системы позволяют решать широкий круг задач по созданию высокоточных оптико-электронных интерференционных приборов для измерения линейных и угловых перемещений в статических и динамических режимах с автоматизацией процесса измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Романова М. Ф. Интерференция света и ее применение. М.—Л., ОНТИ, 1937.
2. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М.—Л., Оборонгиз, 1952.
3. Майкельсон А. А. Световые волны и их применения. М.—Л., Гостехиздат, 1934.
4. Коронкевич В. П., Трулев Ю. И. Фотоэлектрическое устройство для измерения длины с помощью счета интерференционных полос. «Труды институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 47 (107). М.—Л., Стандартгиз, 1961.
5. Зорин Д. И., Трофимова Н. В., Шестопапов Ю. Н. Измерение длины штриховых мер счетом интерференционных полос. «Труды институтов Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов», вып. 78 (138). М.—Л., Изд. стандартов, 1965.
6. Врангел Ф. Н. A Bidirectional Electronic Counter for Use in Optical Interferometry. *J. of the Optical Society of America*, 1953, v. 43, № 10.
7. Ко Hara and Smith D. S. Length Measurement by Fringe Counting «The Review of Scientific Instruments, 1959, v. 30, № 8.
8. Cook H. D. and Marzetta L. A. An Automatic Fringe Counting Interferometer for Use in the Calibration of Line Scales. «Engineering and Instrumentation», 1961, v. 65 c, № 2.
9. Huntoon R. D., Weiss A., Smith W. Electronic Fringe Interpolator for an Optical Interferometer. *J. of the Optical Society of America*, 1954, v. 44, № 4.

Поступила в редакцию 2/1 1967 г.

УДК 531.711.1.058 : 535.822.082.52

О ПОГРЕШНОСТЯХ ИЗМЕРЕНИЙ ШТРИХОВЫХ МЕР
ДВОЙНЫМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МИКРОСКОПОМ

С целью повышения производительности при поверке подразделений штриховых мер во ВНИИМ разработаны для измерения этих мер приборы с двойным фотоэлектрическим микроскопом [1, 2].

Применение при измерении длины штриховых мер фотоэлектрического метода дает возможность не только осуществить объективное наведение на штрихи, но и получить необходимую информацию о положении наблюдаемых в микроскоп штрихов для ввода в электронное измерительное устройство. Применение средств электроники позволило создать малоинерционные приборы и повысить производительность поверки подразделений штриховых мер.

Принцип измерения разности длин штриховых мер, сравниваемых с помощью двойного фотоэлектрического микроскопа, заключается в преобразовании измеряемой разности длин в малый промежуток времени, который измеряют радиотехническим устройством [1].

Метод измерения и конструкции фотоэлектрического микроскопа, а также электронного измерительного устройства описаны в статьях [1—3], поэтому здесь будут более подробно рассмотрены только некоторые источники погрешностей измерений.

В фотоэлектрическом микроскопе изображения начальных штрихов сличаемых мер проецируются в плоскости щелей (рис. 1). Осью этого микроскопа будем называть прямую, проходящую через центр объектива и центр щели.

Если расстояния начальных штрихов $Ш_0$ от осей каналов двойного фотоэлектрического микроскопа одной из мер будут ΔX_0 , а другой $\Delta X'_0$, то в плоскости щели расстояния изображений этих штрихов от середины щелей будут

$$\Delta x_0 = v_1 \Delta X_0 \text{ и } \Delta x'_0 = v_2 \Delta X'_0, \quad (1)$$

где v_1 и v_2 — оптические увеличения каналов микроскопа.

При подаче переменного напряжения на катушки вибратора изображения штрихов начинают колебаться относительно неподвижных щелей с амплитудами a_1 и a_2 . Для большинства конструкций вибраторов колебания подвижной части подчиняются синусоидальному закону и расстояния штрихов от осей микроскопа можно определить как

$$\Delta x_0 = a_1 \sin \omega t_0 \text{ и } \Delta x'_0 = a_2 \sin \omega t'_0, \quad (2)$$

где t_0 и t'_0 — моменты времени, соответствующие совпадению изображений штрихов с осями щелей для каждого канала.

Если $O_1O_2 = L$ — расстояние между каналами микроскопа (рис. 1), а L_0 — расстояние между нулевыми штрихами мер, то начальная разность длин $L_0 - L = \Delta L_0$ будет

$$\Delta L_0 = \Delta X'_0 - \Delta X_0 \quad (3)$$

или

$$\Delta L_0 = \frac{a_2}{v_2} \sin \omega t'_0 - \frac{a_1}{v_1} \sin \omega t_0. \quad (4)$$

Полагая, что $t'_0 = t_0 + \tau_0$, $a_1/v_1 = A_1$, а $a_2/v_2 = A_2$ (τ_0 — временной интервал между импульсами начальных штрихов, A_1 и A_2 — ампли-

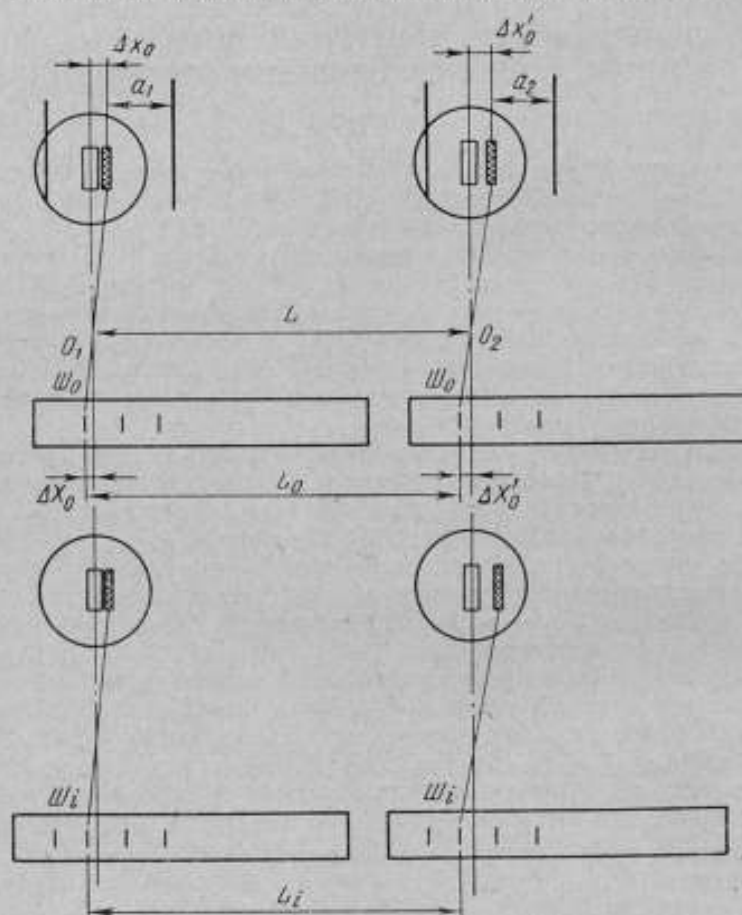


Рис. 1. Принцип сравнения двойным фотоэлектрическим микроскопом штриховых мер, расположенных последовательно.

туды, приведенные к плоскости мер), получим

$$\Delta L_0 = A_2 \left[\sin \omega (t_0 + \tau_0) - \frac{A_1}{A_2} \sin \omega t_0 \right]. \quad (5)$$

Учитывая, что при измерении оптическое увеличение каналов микроскопа v_1 и v_2 , амплитуды a_1 и a_2 , частота вибратора ω остаются постоянными, для определения начальной разности длин ΔL_0 необходимо знать τ_0

и t_0 . Так как на электронном измерительном устройстве измеряют только τ_0 , то необходимо, чтобы

$$t_0 = i \frac{T_n}{2},$$

где $i = 0, 1, 2, 3, \dots$;

T_n — период колебаний вибратора.

Этого можно достичь, когда штрихи мер будут наведены на ось канала фотоэлектрического микроскопа. Тогда выражение (5) будет иметь вид

$$\Delta L_0 = A_2 \sin \omega \tau_0. \quad (6)$$

При $\tau_0 \ll T_n$, что справедливо для измерения малых разностей длин, можно пользоваться уравнением

$$\Delta L_0 = A_2 \omega \tau_0.$$

В этом случае после некоторых преобразований зависимость между ΔL_0 , амплитудой колебаний, увеличением микроскопа и погрешностью измерений будет

$$\Delta(\Delta L_0) = \frac{\Delta L_0^3}{6A_2^2}. \quad (7)$$

При амплитуде колебаний вибратора 0,7 мм и увеличении микроскопа $7\times$ в результат измерений начальной разности длин 10 мкм может войти систематическая погрешность, равная 0,017 мкм. При увеличении начальной разности до 30 мкм эта погрешность возрастает до 0,45 мкм.

Так как совместить штрих с осью микроскопа можно лишь с какой-то погрешностью, то t_0 будет отличным от нуля, и погрешность измерения начальной разности длин возрастет из-за неодинаковых амплитуд колебаний вибратора и увеличений каналов микроскопа.

Чтобы погрешность измерений не превышала заданной величины, определим, с какой точностью необходимо совмещать штрих с осью микроскопа либо с какой точностью должно быть отрегулировано равенство амплитуд колебаний изображений штрихов и оптических увеличений каналов.

Ограничиваясь первыми членами разложения уравнения (5) в ряд, получим

$$\Delta L_0 = A_2 \omega \tau_0 + A_2 \omega t_0 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right). \quad (8)$$

Так как второй член выражения (8) не принимают во внимание, начальную разность длин определяют с погрешностью

$$\Delta(\Delta L_0) = A_2 \omega t_0 \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right). \quad (9)$$

Учитывая, что разность длин ($L_i - L$) для последующих подразделений мер определяют аналогично, то приведенную разность длин i -ых подразделений вычисляют по формуле

$$\Delta L_i = \Delta L_i - \Delta L_0$$

или

$$\Delta L_i = A_2 \omega \left[(\tau_i - \tau_0) + \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) (t_i - t_0) \right]. \quad (10)$$

В этом случае погрешность определения приведенной разности длин, зависящая от неточности совмещения штриха с осью микроскопа, будет

$$\delta(\Delta L_i) = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right) \Delta(\Delta L_i), \quad (11)$$

где $\Delta(\Delta L_i) = A_2 \omega (t_i - t_0)$ — неточность совмещения i -го штриха в линейной мере.

График зависимости погрешности от точности совмещения оси штриха с осью микроскопа для разных значений A_1/A_2 показан на рис. 2.

Как видно из графика, чтобы погрешность $\delta(\Delta l_i)$ не превышала 0,1 мкм при совмещении штриха с осью микроскопа с точностью до 1 мкм, отношение A_1/A_2 должно быть не менее 0,9, а при погрешности совмещения порядка 10 мкм оно должно быть не менее 0,99.

Приведенные амплитуды A_1 и A_2 каналов двойного фотоэлектрического микроскопа можно уравнивать экспериментально, измеряя постоянную разность длин порядка 10 мкм. Совмещение штриха с осью микроскопа по одному каналу производят по осциллографу с точностью порядка 0,1—

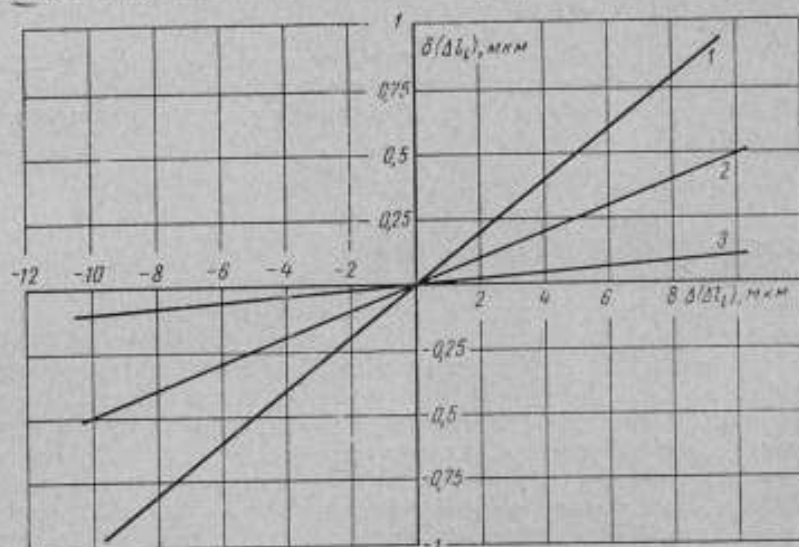


Рис. 2. Зависимость погрешности измерений разностей длин от точности наведения штрихов на ось канала микроскопа.

1, 2, 3 — значения A_1/A_2 , равные соответственно 0,9; 0,95 и 0,99 мкм.

0,2 мкм. Измерив эту разность, записывают соответствующее число импульсов N_1 . Далее стол с мерами перемещают, совмещают штрих с осью микроскопа по другому каналу, измеряют ту же разность и записывают число импульсов N_2 . Отношение N_1/N_2 определит отношение A_1/A_2 . Если $a_1 = a_2$, то получим v_2/v_1 или a_2/a_1 при $v_1 = v_2$.

Уравнять амплитуды практически трудно, а поэтому, укорачивая или удлиняя тубус одного из каналов фотоэлектрического микроскопа, добиваются, чтобы в пределах шумового разброса $N_1 = N_2$, что будет соответствовать значению A_1/A_2 , равному единице.

В табл. 1 даны результаты определения отношения приведенных амплитуд после предварительной юстировки микроскопа. Измерения производили с целью определения возможной погрешности из-за неточного совмещения штрихов с осью микроскопа. Для получения необходимой постоянной разности порядка 10 мкм были использованы юстировочные шкалы № 1 и № 2, разность длин интервалов 100—200 которых равна 8,08 мкм.

Как видно из табл. 1, среднее отношение приведенных амплитуд каналов фотоэлектрического микроскопа равно 0,98. При этом погрешность определения этого отношения не превышает 1,5%; погрешность, обусловленная неточным совмещением штрихов меры с осью микроскопа одного из каналов в пределах 1 мкм, не превышает 0,02 мкм.

Таблица 1

Определение отношения приведенных амплитуд

Номер измерения	Измеренная разность длин (импульсы) по каналу		Отношение отсчетов $\frac{N_1}{N_2} = \frac{A_1}{A_2}$
	первому	второму	
1	-762	-755	+1,01
2	65	71	0,99
3	54	76	97
4	54	70	98
5	51	69	98
6	60	80	98
7	52	82	96
8	66	92	97
9	48	75	97
10	66	86	98
11	66	95	96
12	61	95	0,96

Среднее 0,98

Если оптические увеличения каналов и амплитуды колебаний изображений штрихов одинаковы, т. е. если $v_1 = v_2$, а $a_1 = a_2$ или $A_2 = A_1$, то систематическая погрешность измерений от неточности совмещений штриха с осью микроскопа обращается в нуль.

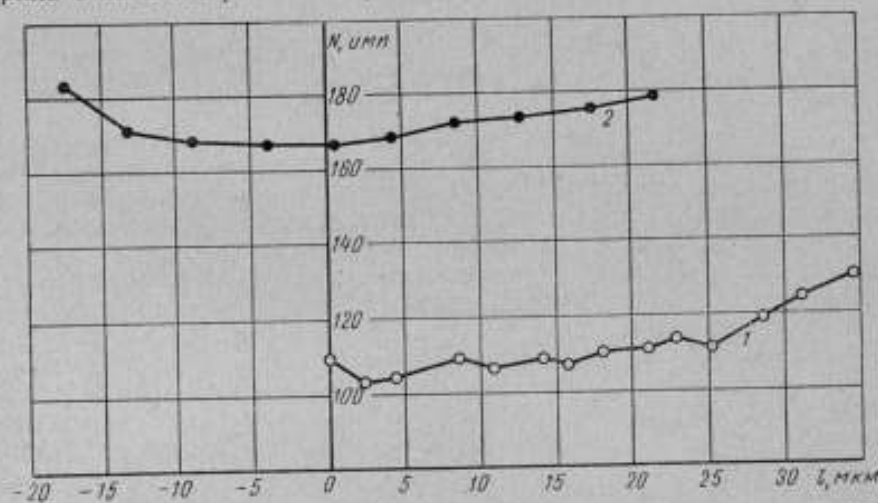


Рис. 3. Измерение постоянной разности длин в зависимости от расположения штрихов мер относительно осей каналов микроскопа.
1 и 2 — разности длин соответственно порядка 3 и 4 мкм.

На рис. 3 показано изменение числа импульсов при измерении постоянной разности длин порядка 3—4 мкм в зависимости от Δ (Δl), т. е. от расположения штрихов мер относительно осей каналов микроскопа. Как видно из графика, на участке ± 20 мкм (в обе стороны от оси микро-

скопа) число импульсов практически остается постоянным. Это говорит о том, что погрешность от неточности совмещения штриха с осью микроскопа не превышает погрешности измерения τ , а $A_1/A_2 \approx 1$, что и подтверждает теоретические предположения.

Так как знак и неточность совмещения i -ых штрихов с осью микроскопа носят случайный характер, то погрешность δ (Δl_i) можно рассматривать как случайную.

Временной интервал τ определяют с помощью эталонной частоты f на электронном измерительном устройстве [3]:

$$\tau = \frac{N}{nf},$$

где N — число высокочастотных импульсов в этом интервале;

n — число измерений временного интервала.

Тогда уравнение измерения разности длин i -го подразделения меры (10) запишем как

$$\Delta l_i = \gamma(N_i - N_0), \quad (12)$$

где $\gamma = \frac{a_{20}}{v_2 n f}$ — значение одного импульса в линейной мере.

Погрешность измерения Δl_i , следовательно, будет складываться из частных погрешностей: определения γ , измерения временного интервала $N_i - N_0$, от неточного совмещения штрихов одной из мер с осью микроскопа — и будет равна

$$\Delta = \sqrt{\sigma_{N_i - N_0}^2 \gamma^2 + \sigma_\gamma^2 (N_i - N_0)^2 + \delta (\Delta l_i)^2}.$$

Вычислим значение Δ по экспериментальным данным, полученным для двойного фотоэлектрического микроскопа. Разность длин любых подразделений измеряют в двух сериях при совмещении штрихов одной из мер с осью микроскопа с точностью до 1 мкм. Совмещение контролируют по осциллографу. Экспериментально определенное значение одного импульса в линейной величине равно $0,0260 \pm 0,0005$ мкм, а приведенная разность длин подразделений не превышает 5 мкм ($N_i - N_0 = 200$ импульсов).

Погрешность измерения временного интервала τ из-за шумов фотоэлементов и разброса порогов срабатывания элементов электронной схемы, определенная по результатам двойных измерений различных разностей длин, составляет ± 5 импульсов при соотношении сигнала к шуму, равном 20 (табл. 2).

Так как N_i и N_0 определяют трехкратным измерением одной разности для каждой серии, то погрешность результата определения разности $N_i - N_0$ равна 2,9 импульса.

Погрешность δ (Δl_i) согласно экспериментальным данным (кривая 2, рис. 3) будет не более 0,02 мкм. Суммарная погрешность измерения разности длин $\Delta \approx 0,13$ мкм. Погрешность же измерения разности длин сантиметровых подразделений, определенная по внутренней сходимости, составляет 0,16 мкм.

Таким образом, вычисленная погрешность соответствует средней квадратической погрешности, определенной экспериментально.

Суммарная погрешность измерения разности длин может быть еще уменьшена, если учесть, что погрешность определения временного интервала из-за шумов фотоэлементов подчиняется статистическому закону распределения, зависит от отношения сигнала к шуму и может быть значительно уменьшена при большем усреднении результата или увеличении отношения сигнала к шуму. Уже при отношении, равном 30, и 16-кратном усреднении результата погрешность измерения временного

Таблица 2

Значения τ (импульсы) при отношении сигнала к шуму, равном 20, и 10-кратном усреднении результата

Номер отсчета	Ход зеркала прямой			Ход зеркала обратный		
	1-й отсчет	2-й отсчет	Разность	1-й отсчет	2-й отсчет	Разность
1	+124	+125	-1	-292	-289	-3
2	+128	+124	+4	-289	-284	-5
3	+65	+65	0	-181	-176	-5
4	+65	+68	-3	-175	-171	-4
5	+63	+56	+7	-230	-229	-1
6	+55	+50	+5	-232	-217	-15
7	-79	-80	+1	-227	-228	+1
8	-93	-82	-11	-229	-239	+10
9	+100	+102	-2	-242	-237	-5
10	+101	+100	+1	-244	-243	-1
11	-167	-152	-15	-157	-166	+9
12	-168	-166	-2	-156	-160	+4
13	+56	+53	+3	-164	-167	+3
14	+57	+48	+9	-160	-168	+8
15	-99	-103	+4	-215	-221	+6
16	-110	-102	-8	-213	-215	+2
17	+62	+66	-4	-213	-202	-11
18	+72	+61	+11	-211	-208	-3
19	+47	+47	0	-160	-166	+6
20	+40	+35	+5	-165	-167	+2
21	-93	-101	+8	-219	-229	+10
22	-98	-88	-10	-219	-230	+11
23	+40	+34	+6	-209	-210	+1
24	+44	+35	+9	-205	-206	+1
25	-82	-77	-5	-110	-125	+15
26	-78	-76	-2	-112	-114	+2
27	-44	-37	-7	-248	-246	-2
28	-41	-35	-6	-235	-239	+4
29	-40	-52	+12	-115	-128	+13
30	-40	-50	+10	-129	-119	-10
31	+25	+26	-1	-110	-106	-4
32	+42	+39	+3	-104	-99	-5
33	-54	-58	+4	-92	-92	0
34	-58	-55	-3	-86	-88	+2

 $\sigma = \pm 5$ импульсов $\sigma = \pm 5$ импульсов

Таблица 3

Значение τ (импульсы) при отношении сигнала к шуму, равном 30, и 16-кратном усреднении результата

Номер отчета	Ход зеркала прямой			Ход зеркала обратный		
	1-й отчет	2-й отчет	Разность	1-й отчет	2-й отчет	Разность
1	+491	+494	-3	+459	+458	+1
2	+586	+580	+6	+544	+538	+6
3	+508	+513	-5	+451	+448	+3
4	+504	+502	+2	+463	+464	-1
5	+596	+598	-2	+559	+564	-5
6	+529	+531	-2	+454	+451	+3
7	+662	+657	+5	+637	+644	-7
8	+557	+559	-2	+477	+482	-5
9	+679	+683	-4	+623	+626	-3
10	+559	+546	+13	+493	+490	+3
11	+565	+561	+4	+513	+511	+2
12	+717	+722	-5	+699	+701	-2
13	+585	+578	+7	+511	+512	-1
14	+706	+705	+1	+695	+690	+5
15	+565	+569	-4	+509	+502	+7
16	+754	+757	-3	+736	+738	-2
17	+745	+743	+2	+706	+708	-2
18	+585	+587	-2	+513	+510	+3
19	+739	+746	-7	+743	+735	+8
20	+591	+589	+2	+526	+523	+3
21	+656	+655	+1	+619	+619	0
22	+833	+835	-2	+831	+822	+9
23	+627	+630	-3	+532	+532	0
24	+814	+817	-3	+907	+909	-2
25	+658	+658	0	+568	+563	+5
26	+835	+834	+1	+811	+811	0
27	+686	+681	+5	+620	+621	-1
28	+813	+814	-1	+847	+847	0
29	+633	+638	-5	+548	+545	+3
30	+868	+867	+1	+886	+880	+6
31	+652	+655	-3	+596	+601	-5
32	+695	+694	+1	+641	+641	0
33	+886	+890	-4	+901	+897	+4
34	+763	+770	-7	+689	+688	+1

 $\sigma = \pm 3$ импульса $\sigma = \pm 3$ импульса

интервала составила ± 3 импульса (табл. 3). Если результат брать из 100, а не из 16 усреднений, то разброс числа импульсов не превысит $\pm 3/\sqrt{6,2}$, т. е. $\pm 1,2$ импульса. Тогда погрешность из-за шумового разброса не будет превышать 0,03 мкм, а основную погрешность будет вносить погрешность определения γ , которую можно понизить, если при измерении γ пользоваться специальными шкалами, аттестованными с погрешностью менее $\pm 0,1$ мкм.

Анализ возможных погрешностей двойного фотоэлектрического микроскопа показал, что при соблюдении определенных значений параметров микроскопа погрешность сравнения штриховых мер не будет превышать 0,1 мкм. В погрешность измерения подразделений поверяемой меры, кроме погрешности сравнения фотоэлектрическим микроскопом, войдут еще погрешности аттестации образцовой меры и температурная погрешность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тришин Н. В. Измерительное устройство к двойному фотоэлектрическому микроскопу. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Изд. стандартов, 1965.
2. Каяк Л. К., Горюпин С. И., Тришин Н. В., Яценцев О. В. Двойной фотоэлектрический микроскоп для компарирования подразделений штриховых мер длины. «Труды институтов Госкомитета» вып. 78 (138). М.—Л., Изд. стандартов, 1965.
3. Тришин Н. В. Измерение малых разностей длин при помощи двойного фотоэлектрического микроскопа. «Измерительная техника», 1965, № 6.

Поступила в редакцию 10/IV 1966 г.

ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

В ряде областей измерительной техники и научных исследований требуется обеспечить измерение длины перемещений с точностью до сотых долей микрометра (при поверке приборов с ценой деления менее 1 мкм, измерении штриховых и концевых мер, треков частиц, в дилатометрии, при измерениях размеров прецизионных шарикоподшипников и др.). В связи с этим все большее значение приобретает метод измерения длины путем интерференционных полос [1] с применением интерферометров повышенной чувствительности к линейным перемещениям.

Перемещение узла с зеркалом интерферометра приводит к изменению разности хода L :

$$L = 2i(N + \epsilon) \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

где i — коэффициент оптического преобразования;

N — целая и ϵ — дробная части интерференционных полос;

λ — длина волны.

Коэффициент i зависит от схемы интерферометра и характеризует чувствительность интерференционной картины при преобразовании линейного смещения зеркала в изменение разности хода. Значение i определяется смещением числа полос интерференционной картины при перемещении зеркала на одну полосу.

При изменении разности хода в интерферометре в каждой точке поля интерференции происходит изменение фазы светового потока и освещенности, создающее смещение полос интерференционной картины.

Для интерферометра Майкельсона $i = 1$, и перемещение зеркала на $\lambda/2$ приводит к смещению интерференционной картины на выходе интерферометра на одну полосу.

Можно построить схему интерферометра, для которого перемещение преобразуется в разность хода при $i > 1$. Такой интерферометр имеет более высокую чувствительность к перемещению зеркала: в нем перемещению зеркала на $\lambda/2$ соответствует изменение разности хода на $2i$ полос. Схемы интерферометра повышенной (удвоенной) чувствительности опубликовали Рентч [2], Харихаран и Синг [3], В. П. Коронкевич [4] и др.

В схеме компаратора Рентча, предназначенного для измерения штриховых мер по концевым (рис. 1), пучок источника белого света 15 через коллиimator 13 падает на разделяющую пластину 12, после разделения на которой зеркалами 10, 11 в ветви отраженного пучка и зеркалом 9 в ветви проходящего пучка света направляется на двугранные зеркала или

призмы 3 и 4, жестко связанные с каретками 2 и 5, на которых установлены поверяемая 6 и вспомогательная 1 штриховые меры. Отраженный призмой 3 пучок падает на зеркало 14, а призмой 4 — на пластину 7 с притертой концевой мерой. При перемещении кареток интерференционную картину полос равной толщины в белом свете наблюдают через систему объектив—окуляр 8 в моменты, при которых длины хода лучей, отраженных от относительного зеркала 14 и от измерительной поверхности концевых мер.

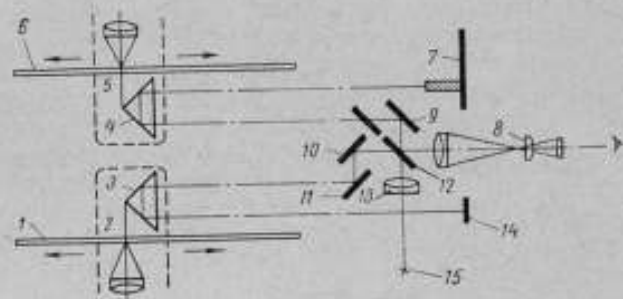


Рис. 1. Схема интерферометра повышенной чувствительности ($i = 2$) для измерения в белом свете шкал по концевым мерам.

вой меры или пластины 7, равны. Для измерения длины интервала шкалы L применяют концевую меру длиной $2L$; это означает, что перемещение каретки на $\lambda/2$ соответствует изменению разности хода в интерферометре не на λ , как в двухлучевом интерферометре Майкельсона, а на 2λ , т. е. чувствительность интерферометра Рентча к перемещениям удвоена.

Удвоенную чувствительность к перемещениям имеет также интерферометр с двойным прохождением лучей, впервые описанный Харихараном и Сингом [3]. Согласно одному из вариантов схемы такого интерферометра (рис. 2), разработанному в НГИМИП и нашедшему применение в ряде приборов со счетчиками интерференционных полос, пучок лучей в интерферометре с основными зеркалами 2 и 3 проходит афокальную систему объектива 4, в фокусе которого установлено зеркало 5, после чего пучок лучей возвращается в разделяющую пластину 1 и вторично проходит тот же путь.

Зеркало 5 установлено под малым углом таким образом, что после вторичного отражения от зеркал 2 и 3 пучки проходят через разделяющую пластину и объектив 4, собираясь в фокальной плоскости, где помещена диафрагма 6. Интерференционная картина проецируется в фотоприемное устройство или ее наблюдают визуально.

В схемах интерферометров, приведенных на рис. 1 и 2, коэффициент преобразования $i = 2$; при этом перемещению зеркала на $\lambda/2$ соответствует смещение интерференционной картины на выходе интерферометра на две полосы.

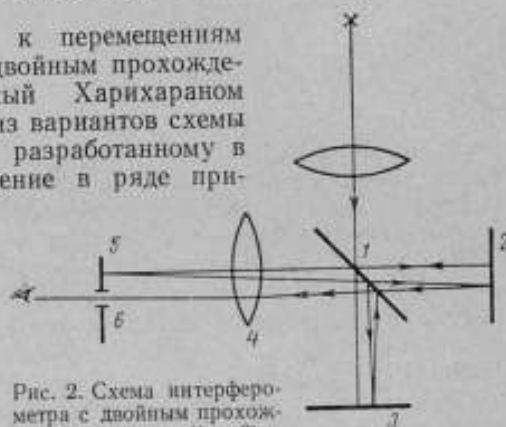


Рис. 2. Схема интерферометра с двойным прохождением пучка ($i = 2$).

Примером оптической схемы интерферометра, в которой $i > 2$, может служить схема* интерферометра Майкельсона (рис. 3) с блоком зеркал 19—21, в котором происходит многократное отражение лучей. Пучок лучей источника 1 в этой схеме через конденсор 2 и коллиматор 3, 4 направляется на разделяющую пластину 5. В одной ветви интерферометра расположено относительное зеркало 18, в другой ветви — система зеркал 19—21.

Зеркала 19 и 20 связаны с подвижной системой. Пучок лучей после многократного отражения от указанных зеркал возвращается в разделяющую пластину, интерферируя с пучком ветви относительного зеркала. Зеркала 19 и 21 могут быть параллельны или установлены под малым углом друг к другу, в зависимости от чего можно получить требуемое

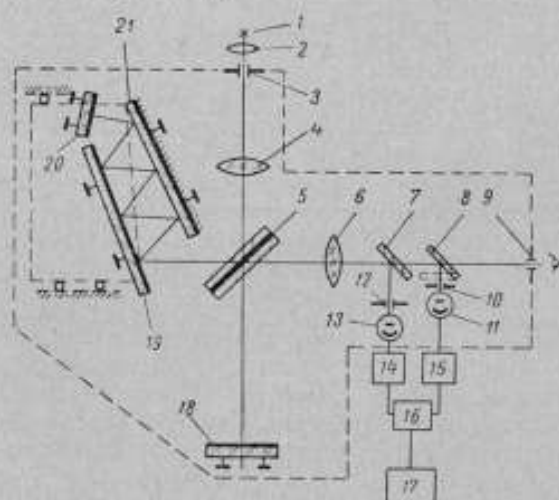


Рис. 3. Схема интерферометра с многократным отражением пучка ($i \geq 2$) для малых перемещений.

число n отражений и различную чувствительность интерферометра к перемещениям.

Для счета интерференционных полос в наблюдательную систему 6—9 интерферометра встроена двухканальная система, например с полупрозрачным 7 и полностью отражающим 8 зеркалами, щелями 10, 12 и фотоумножителями 11 и 13 для преобразования информации интерферометра в электрические сигналы. Электронная аппаратура 14—17 служит для преобразования непрерывного периодического сигнала в дискретно-цифровую форму.

Расположение плоских зеркал в данной схеме и влияние их наклона на перемещение ограничивает применение этого интерферометра лишь для измерения малых длин.

Другой интерферометр повышенной чувствительности** с $i > 2$ для измерения перемещений представлен на рис. 4.

Пучок рабочей ветви интерферометра отражается сначала от сферической поверхности радиуса ρ_2 , затем от расположенной в его фокусе сферы радиуса ρ_1 и, вновь отразившись от сферы с ρ_2 , выходит из блока 5 в точке, диаметрально противоположной входящему лучу. Далее пучок падает на уголкового отражателя 6 и возвращается обратно параллельно самому себе с некоторым смещением. На плоском зеркале 7 пучок меняет направление и, пройдя описанный выше путь, возвращается на разделяющую пластину 3, интерферируя с пучком ветви относительного зеркала 4. Вместо плоского зеркала может быть поставлен ряд отражателей (например, уголкового), благодаря которым пучок будет дополнительно проходить через систему, что повышает чувствительность к смещениям. Система отражателей 5 и 6 обеспечивает параллельность падающего и отраженного

* Трофимова Н. В. Авторское свидетельство № 188064 от 27 августа 1965 г. «Бюллетень изобретений», № 21, 1966.

** Трофимова Н. В., Цорин В. Г. Авторское свидетельство № 203972 от 21 февраля 1967 г. «Бюллетень изобретений», № 21, 1967.

пучков в ветви подвижной каретки, уменьшая влияние непрямолинейности перемещений.

При измерении счетом интерференционных полос световой поток на выходе интерферометра преобразуется с помощью электронной аппаратуры в электрические сигналы.

Исходной информацией для преобразования в импульсы является пропускаемый через щель световой поток F_1 , модулированный приблизительно по синусоидальному закону [5]

$$F_1 = F_0 \cos \frac{2\pi}{\lambda} \delta_0 \frac{\sin 2\pi \Delta/\lambda}{2\pi \Delta/\lambda}, \quad (2)$$

где F_0 — световой поток при отсутствии интерференции;

δ_0 — разность хода в центре щелей каналов;

Δ — разность хода на краях щели.

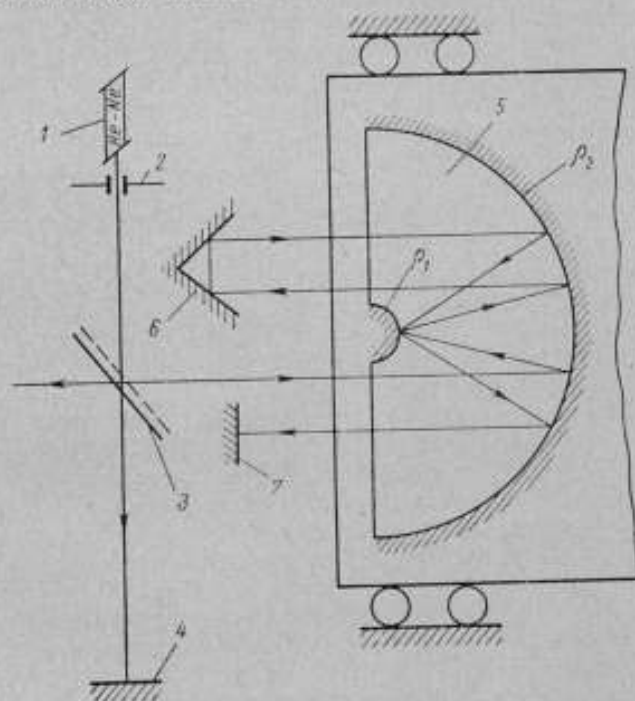


Рис. 4. Схема интерферометра с многократным отражением пучка ($i > 2$) для больших перемещений.

1 — источник (рекомендуется лазер), 2 — щель, 3 — разделяющий блок, 4 — относительное зеркало, 5 — сферический отражатель или блок сферических зеркал с параллельными поверхностями (радиусы ρ_1 и $\rho_2 = 2\rho_1$), 6 и 7 — неподвижные зеркала, уголкового и плоские (могут быть оба уголкового).

Для реверсивного счета преобразование информации от интерференционной картины в дискретно-цифровую форму происходит по двум каналам со сдвигом фаз $\pi/2$. Тогда световой поток F_2 от интерференционной картины во втором канале соответственно будет равен

$$\begin{aligned} F_2 &= F_0 \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} i \delta_0 + \frac{\pi}{2} \right) \frac{\sin 2\pi \Delta/\lambda}{F_1 2\pi \Delta/\lambda} = \\ &= F_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} i \delta_0 \frac{\sin 2\pi \Delta/\lambda}{2\pi \Delta/\lambda}. \end{aligned}$$

Световой поток F_1 , изменяясь по закону, близкому к синусоидальному, будет иметь экстремальные значения:

$$F_1 = F_{\max} \text{ для первого канала при } \frac{2\pi i \delta}{\lambda} = \pi \text{ и } \delta = \frac{\lambda}{2i};$$

$$F_1 = F_{\min} \text{ при } \frac{2\pi i \delta}{\lambda} = \frac{\pi}{2} \text{ и } \delta = \frac{\lambda}{4i},$$

т. е. изменение разности хода на λ и перемещение интерференционной картины на $\lambda/2$ соответствуют смещению зеркала на $\Delta l = \frac{\lambda}{2i}$.

Периодические изменения светового потока преобразуются фотоэлектронным приемным устройством в синусоидальный электрический сигнал. Так как изменение фазы светового потока по сравнению с перемещением происходит в i раз быстрее, чем в обычном интерферометре Майкельсона, то число периодов синусоидального колебания светового потока, а следовательно, и электрического сигнала, будет в i раз больше. Перемещение зеркала на $\lambda/2$ в этом случае будет соответствовать смещению интерференционной картины на i полос.

Преобразовать электрические сигналы в дискретно-импульсную форму можно в общем случае таким образом, что период изменения электрического сигнала будет соответствовать k импульсам, причем k можно принять за коэффициент электрического преобразования информации. Тогда перемещение каретки на $\lambda/2$ приведет к появлению на выходе электронной аппаратуры числа импульсов $l = i \cdot k$.

Электронные схемы с $k = 2$ осуществлены в ФРГ в приборе фирмы Лейтц [6], японском приборе [7] и опробованы во ВНИИМ.*

В экспериментальной разработке НГИМИП однонаправленного счетчика интерференционных полос шаг дискретности также уменьшен путем электронных преобразований.

В ряде интерферометров [1] электронная аппаратура обеспечивает дискретно-цифровой выход целых N и аналоговый способ определения дробных ϵ частей порядка интерференции (по показывающему прибору, например, экрану осциллографа, компенсационным методом и др.). Необходимость визуальных отсчетов дробных частей порядка интерференции по прибору усложняет процесс измерения и снижает его производительность.

При $i = 1$ и $k = 1$ один импульс на выходе электронной аппаратуры соответствует перемещению зеркала на $\lambda/2$, и шаг дискретности информации равен $\lambda/2$ (0,28 мкм для зеленой линии ртути).

Преобразование информации интерферометра по схемам $i > 1$, $k > 1$ с шагом дискретности $\lambda/2ik$ позволяет ограничить измерение некоторой длины l

$$l = \left(\frac{N_0}{ik} + \frac{r_0}{ik} \right) \frac{\lambda}{2}$$

с точностью до целых импульсов, т. е. полагать $l \approx \frac{N}{ik} \cdot \frac{\lambda}{2}$. Например, при $ik = 4$, технически просто достигаемом средствами, обеспечивающими $i = 2$, $k = 2$,

$$\frac{\lambda}{2ik} \approx 0,07 \text{ мкм.}$$

Ограничение информации целым числом импульсов при повышенной чувствительности оптической и электрической схем упрощает задачу получения информации полностью в цифровой форме, необходимой для

* См. стр. 69.

автоматической регистрации результатов измерений и обеспечивающей точность, достаточную в ряде случаев. В то же время для особо точных работ в интерферометре повышенной чувствительности могут быть применены схемы с показывающими (интерполяционного или компенсационного действия) приборами, позволяющими учитывать и дробную составляющую часть импульса $\frac{v}{ik} \cdot \frac{\lambda}{2}$.

В этом случае, если отсчетное устройство позволяет определить m -ю долю импульса (m — коэффициент интерполяции), то дробная часть порядка интерференции будет определена с точностью $\lambda/2ikm$.

Необходимо указать ряд особенностей интерферометров повышенной чувствительности по сравнению с обычным двухлучевым интерферометром Майкельсона.

1. Потери света P в интерферометрах повышенной чувствительности возрастают, их определяют по формуле

$$P = T^{n_1} R^{n_2},$$

где T — потери света при прохождении оптических деталей интерферометра;

R — потери при отражении;

n_1 и n_2 — число проходов и отражений пучка лучей соответственно.

В интерферометрах, схемы которых приведены на рис. 1 и 3, возрастание потерь света происходит за счет повышения числа отражений. Так как число отражений n_2 в них связано с чувствительностью i выражением $n_2 = 4i - 3$, то потери света в зависимости от чувствительности этих интерферометров будут

$$P_i = T^2 R^{4i-3}.$$

Для интерферометра двойного прохождения потери света, помимо дополнительных отражений, обуславливаются прохождением полупрозрачной разделяющей пластины и определяются выражением

$$P_i = T^{2i} R^{(i)}.$$

Поэтому даже без учета дополнительных отражений потери света в интерферометре двойного прохождения в четыре раза больше, чем в интерферометрах, созданных по схемам рис. 1 и 3.

2. С повышением чувствительности используемая для измерения одного и того же перемещения разность хода возрастает (1). Это приводит к повышению требований к монохроматичности источника.

3. При счете интерференционных полос в интерферометрах повышенной чувствительности требования к прямолинейности перемещения для случая схемы рис. 3 и частично рис. 1 возрастают.

Одним из условий сохранения реверсивного счета полос при работе электронной аппаратуры является постоянство сдвига фаз электрических сигналов. Для схемы, приведенной в работе [1], например, это постоянство должно быть выдержано в пределах $\pm \pi/6$, что приводит к зависимости [8]

$$\frac{2\pi}{\lambda} i \delta \leq \frac{\pi}{6},$$

ограничивающей допускаемое приращение разности хода при наклоне зеркал условием $\delta \leq \frac{\lambda}{12i}$.

Следовательно, допускаемые углы наклона зеркал $\Delta\alpha$, зависящие от приращения разности хода δ на некотором размере d поля интерференции

(определяемом смещением щелей), с которого снимают информацию (2), находят из условия $\Delta\alpha < \frac{\delta}{d}$ или $\Delta\alpha < \frac{\lambda}{12ld}$.

Таким образом, при повышении чувствительности интерферометра к перемещениям повышаются требования к прямолинейности, т. е. $\Delta\alpha \sim i^{-1}$.

В интерферометрах, приведенных на рис. 1, 2 и 4, оптической схемой предусматривается уменьшение влияния непрямолинейности перемещения. В интерферометрах рис. 1 и 4 применены уголковое зеркало и сферический отражатель, уменьшающие влияние непрямолинейности перемещения и обеспечивающие постоянство ширины полос, а следовательно, и фазового соотношения.

В интерферометре двойного прохождения (рис. 2) афокальная система объектив — зеркало предусмотрена для поворота пучка относительно оси, что делает независимой разность хода от наклона зеркала.

4. Для параллельности пучка интерферометра повышенной чувствительности диаметр d_0 входного отверстия должен удовлетворять условию

$$d_0 < \sqrt{\frac{\lambda}{2l}}$$

С повышением чувствительности размеры входного отверстия должны быть уменьшены, что ограничивает общее количество света, т. е. световой поток F_0 , поступающий в интерферометр.

Интерферометры повышенной чувствительности удобны для измерений методом счета интерференционных полос, так как позволяют повысить точность измерения за счет высокой чувствительности. Вследствие уменьшения шага дискретности информации на выходе электронной аппаратуры применение интерферометров повышенной чувствительности для измерения перемещений в ряде случаев дает возможность ограничиться дискретно-цифровой формой отсчета, что облегчает возможность автоматической регистрации результатов измерений. В то же время интерферометры повышенной чувствительности, с одной стороны, предъявляют некоторые дополнительные требования по сравнению с интерферометром Майкельсона к монохроматичности источников света, в ряде случаев — к прямолинейности перемещения, с другой — при эксплуатации их повышаются потери света, связанные с дополнительными отражениями или прохождением пучка света через оптическую систему интерферометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зорин Д. И., Трофимова Н. В., Шестопапов Ю. Н. Измерение штриховых мер счетом интерференционных полос. «Труды институтов Госкомитета», вып. 78 (138). М.—Л., Издательство стандартов, 1965.
2. Rappelsch K. «Optik», 1949, № 4, Heft 4/5.
3. Nagibarn P., Sen D. «Jes of Am.», 1960, v. 50, № 4.
4. Ленкова Г. А., Коронкевич В. П. Интерферометры с двойным прохождением лучей. «Оптика и спектроскопия», 1967, т. XXIII, вып. 2.
5. Захарьевский А. Н. Интерферометры. М., Оборонгиз, 1953.
6. Носк Е. «Maschinenmarkt», 1965; Würzburg 71 (1965), № 27.
7. Dooy J., Shinuzi K., Tsuboy T. a. Kono T. J. «Mechanical Laboratory», 1962, v. 16, № 3.
8. Трофимова Н. В. Интерферометр с плоскими зеркалами для измерения перемещений счетом интерференционных полос. «Механизация и автоматизация изготовления шкал, сектор и лимбов к отсчетным устройствам», ч. 2, Л., ЛДНТП, 1966.

Поступила в редакцию 17/1 1967 г.

Ю. П. ЕФРЕМОВ, Е. И. ЛАТЫШЕВА,
Е. Е. ШАРОВА, О. Ю. ШОШИНА

ВНИИМ

УДК 531.732 : 666.19

ИЗМЕРЕНИЕ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ РАЗМЕРОВ КУБОВ ИЗ ПЛАВЛЕНОГО КВАРЦА

При определении плотности ртути [1] необходимо было найти объемы двух кварцевых кубов с ребрами длиной 100 и 72 мм (см. рисунок) и, следовательно, измерить их геометрические размеры. Линейные размеры этих кубов были измерены по трем взаимно-перпендикулярным направлениям на интерферометре Кестерса.

К интерферометру были изготовлены вновь сконструированные* стойка, специальный стол для установки на нем кубов с пластиной и футляр для местного термостатирования прибора. Рукоятки для перемещений стола вынесены из местного термостата наружу.

При измерениях кубы притирали (куб 100 мм — три раза, куб 72 мм — четыре раза) к аттестованной вспомогательной плоской пластине из плавленого кварца диаметром 160 и толщиной 24 мм. Рабочая поверхность пластины имела отклонения от плоскостности, не превышающие $0,05 \lambda/2$, т. е. 0,015 мкм. При четвертой притирке, в отличие от третьей, куб был притерт противоположной гранью.

На каждом из четырех ребер верхней свободной грани куба фиксировали, отсчитывая по шкале механизма, перемещающего стол с кубом, 11 точек (0, 1, 2, . . . , 10) для куба 100 мм и 10 точек (1, 2, . . . , 10) для куба 72 мм. Точки 0 и 10 для большего и 1 и 10 для меньшего кубов находились на расстоянии 3 мм от концов ребер, расстояния между остальными точками были одинаковыми: по 9,4 мм для большего куба и 7,3 мм — для меньшего.

Таким образом, при каждой притирке измеряли расстояния между двумя противоположными гранями куба в 44 или 40 точках, т. е. длину перпендикуляров, опущенных из каждой точки верхней грани на поверхность нижней грани (точнее, на поверхность пластины, к которой эта грань притерта).

Абсолютный интерференционный метод измерения на интерферометре Кестерса, как известно, заключается в определении отклонения действительного значения измеряемой длины от предварительно измеренного с погрешностью до 1—2 мкм (номинального значения).

Номинальные размеры кубов (расстояния между противоположными гранями) были измерены техническим интерференционным методом. Для этого к пластине с притертым к ней кубом притирали вблизи одной из его

* Конструктор В. С. Степанов.

граней блок стальных концевых мер длины 1-го разряда и выдерживали его в течение 2—3 суток. Номинальные размеры кубов $L_{A_1-A_4}$, $L_{B_1-B_4}$, \times $L_{C_1-C_4}$, приведенные к температуре 20° С, были найдены равными

$$70,889 \times 72,292 \times 72,715 \text{ мм}$$

и

$$99,141 \times 99,984 \times 100,577 \text{ мм.}$$

Источниками света при измерениях служили безэлектродная лампа, заполненная изотопом ртути ^{199}Hg , и лампа с накаливаемыми электродами, заполненная изотопом кадмия ^{114}Cd .

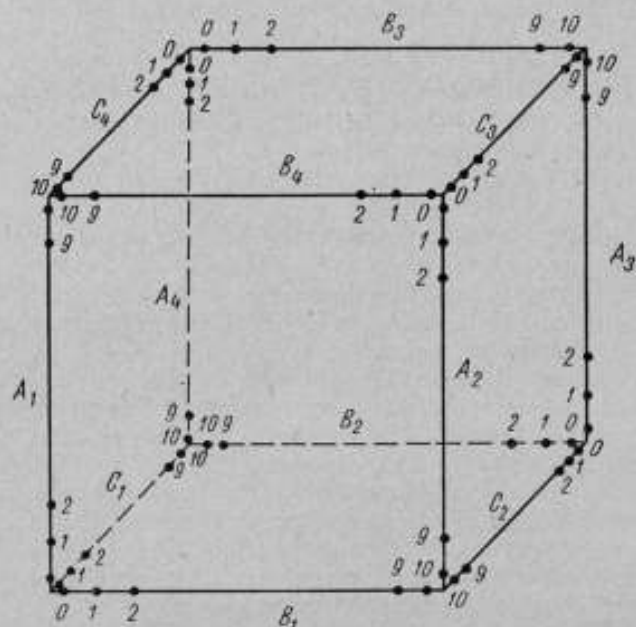


Схема обозначений ребер кубов и точек на ребрах.

В табл. 1 приведены принятые при измерениях значения длин волн ^{199}Hg и ^{114}Cd в нормальном воздухе, т. е. при температуре $t = 20^\circ \text{C}$, давлении $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$ и влажности воздуха $f = 10 \text{ мм рт. ст.}$ При расчете этих данных исходили из значений длин волн соответствующих линий в вакууме, принятых в качестве вторичных эталонов [2], и из формул Баррела [3] и Эдлена [4] для коэффициента преломления воздуха.

Температуру кубов измеряли шестью дифференциальными медь-константановыми термопарами, значения постоянных которых равны

Таблица 1

Значения длин волн λ_D в нормальном воздухе, мкм

^{199}Hg	^{114}Cd
0,57906933	0,64385026
0,57696288	0,50858474
0,54607820	0,47999360
0,43583608	0,46781737

в среднем 0,003 град/дел. Рабочий спай каждой из четырех термопар располагали на гранях измеряемого куба, пятой — на поверхности нижней вспомогательной пластины, шестой — в воздухе, вблизи грани, вдоль которой производили измерение, так, чтобы этот спай не мешал наблюдению интерференционной картины. Другой спай (холодный) каждой термопары находился в сосуде Дьюара с трансформаторным маслом, температуру которого измеряли стеклянным палочным термометром с ценой деления 0,01° С. Температуру куба принимали равной средней из температур шести спаев термопар. Перед измерениями кубы выдерживали на столе прибора в течение 16 ч и более.

Куб 72 мм измеряли при 20—20,2° С. Изменения его температуры за 6—7 ч не превышали 0,02 град. Разность температур граней куба не превышала 0,02 град. Куб 100 мм измеряли при 20,5—22° С. Максимальное изменение его температуры за 6—7 ч не превышало 0,14 град.

Разность температур граней куба находилась в пределах 0,01 ± 0,07 град. Большую часть измерений проводили при разности до 0,02 град, измерение вдоль одного ребра каждого куба продолжалось 25—30 мин.

Результаты измерений линейных размеров кубов (отклонение действительного расстояния между противоположными гранями при 20° С от номинального) приведены в табл. 2. Под действительной длиной ребра принята, как уже указывалось, длина перпендикуляра, опущенного из соответствующей точки верхней грани на нижнюю.

Показанная на рисунке схема обозначений ребер и точек на них дает возможность легко контролировать правильность измерений. Измеряемые расстояния, например в точках 1 ребра C_1 и 1 ребра B_3 , в точках 10 ребра C_4 и 10 ребра B_4 куба 72 мм (табл. 2) или в точках 0 ребра A_2 и 0 ребра C_3 куба 100 мм, не должны сильно отличаться друг от друга. Заметное расхождение результатов измерений в таких точках, например в точках 0 ребра A_2 и 0 ребра C_2 , 10 ребра B_2 и 10 ребра A_4 куба 100 мм, дает основание утверждать, что отклонения поверхности грани от плоскости вблизи этих точек наибольшие.

При расчете погрешностей измерения линейных размеров кубов будем исходить из реальных условий измерения каждого куба и следующего выражения результата абсолютных интерференционных измерений длины:

$$\Delta L_{20} = \Delta_e + \Delta_a + \Delta_\lambda + \Delta_0, \quad (1)$$

где ΔL_{20} — отклонение действительной длины при 20° С от номинальной;

Δ_e — отклонение, измеренное методом совпадения дробных частей порядков интерференции e ;

Δ_a — поправка на тепловое расширение кварцевого куба;

Δ_λ — поправка на отличие длин волн λ в условиях измерения от длин волн λ_N в нормальных условиях;

Δ_0 — поправка на конечный размер входной диафрагмы интерферометра.

Подсчитаем средние квадратические погрешности σ , определяя каждого слагаемого суммы (1), исходя из оценки предельных погрешностей измеряемых величин:

$$\Delta_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - e_i^0) \frac{\lambda_i}{2},$$

где n — число использованных спектральных линий (в данном случае $n = 4$);

e_i и e_i^0 — измеренные и рассчитанные дробные части порядков интерференции;

λ_i — длины волн спектральных линий.

Отклонения действительного расстояния между противоположными гранями при 20° С от номинального, мкм

Точки	Противоположные грани																			
	C_1, B_3, C_2, B_1				A_3, C_4, A_2, C_1				B_1, A_1, B_2, A_4				B_2, A_2, B_3, A_1							
	C_4	B_3	C_2	B_1	A_3	C_4	A_2	C_1	A_1	C_3	A_3	C_2	B_2	A_2	B_3	A_1	B_4	A_4	B_1	A_1
При $L_{A_2-A_4} = 70,889$																				
1	-0,34	-0,33	+0,11	+0,08	+0,82	+0,81	+0,82	+0,82	+0,84	+0,58	+0,56	+1,66	+1,67	+1,04	+1,08	+1,14	+1,06			
2	28	31	09	05	88	82	82	82	88	61	57	58	58	0,98	0,98	17	11			
3	26	29	08	03	90	84	84	84	90	65	59	51	49	95	92	22	16			
4	22	25	08	01	95	84	84	84	92	70	67	43	38	88	86	26	22			
5	18	21	08	+0,01	97	84	83	83	94	73	73	35	30	81	80	32	28			
6	15	19	0,6	-0,01	97	82	82	82	94	78	80	29	24	75	72	39	34			
7	14	17	+0,03	0,4	98	80	80	80	94	83	86	24	17	72	67	44	40			
8	15	15	-0,02	1,0	99	76	77	77	94	88	+0,94	20	13	67	63	50	45			
9	14	15	0,5	3,4	98	72	74	74	95	+0,94	+1,02	16	09	61	58	54	54			
10	-0,13	-0,10	-0,08	-0,13	+0,97	+0,69	+0,70	+0,70	+0,94	+1,00	+1,10	+1,13	+1,06	+0,54	+0,54	+1,61	+1,60			
При $L_{C_1-C_4} = 72,592$																				
При $L_{B_1-B_4} = 72,715$																				
При $L_{A_1-A_4} = 70,889$																				
При $L_{C_1-C_4} = 100,575$																				
10	+0,63	+0,78	+0,65	+0,57	+0,19	-0,21	-0,20	+0,14	+0,14	+1,36	+1,27	+1,20	+1,10							
9	72	72	65	50	21	20	24	16	16	38	35	15	09							
8	+0,65	69	66	48	19	18	26	08	08	44	41	10	06							
7	64	64	64	36	17	14	31	-0,02	-0,02	27	43	05	04							
6	66	64	65	36	10	34	34	07	07	33	49	02	+0,98							
5	68	64	70	36	08	30	36	14	14	39	54	+0,93	94							
4	68	64	70	35	05	26	38	14	14	45	58	85	88							
3	64	64	68	37	03	20	45	20	20	52	62	79	80							
2	65	65	68	38	03	16	45	24	24	60	64	74	70							
1	63	69	67	43	-0,01	12	44	23	23	65	65	68	61							
0	64	65		43	0,00	0,00	39	22	22	67	70	62	58							

Пример чане. Для куба 100 мм наблюдались местные отклонения грани B_3, C_3, B_4, C_4 от плоскости вблизи точек $\vartheta - C_4, A - B_3, \theta - C_3$ меньшие измерения.

Предельную погрешность измерения ϵ_i в первом приближении для каждой спектральной линии можно положить одинаковой и равной $\pm 0,1\lambda/2$. Длины волн спектральных линий ^{198}Hg и ^{114}Cd (табл. 1) известны с относительной предельной погрешностью $\pm 5 \cdot 10^{-8}$ и $\pm 7 \cdot 10^{-8}$, что соответствует предельным погрешностям определения ϵ_i^0 : $\pm (0,02 \div 0,03)$ для куба 100 мм и $\pm (0,015 \div 0,022)$ для куба 72 мм.

При нормальном законе распределения средние квадратические погрешности измерения ϵ_i и ϵ_i^0 втрое меньше предельных [5], поэтому среднюю квадратическую погрешность определения Δ_ϵ получаем практически одинаковой для обоих кубов и равной $\sigma_\epsilon = 0,009$ мкм.

Второе слагаемое суммы (1) равно

$$\Delta_\alpha = \alpha l (20^\circ - t),$$

где α — температурный коэффициент удлинения;
 l — измеряемое расстояние между гранями;
 t — температура куба.

Погрешность измерения температуры спаев термопар не превышала $\pm 0,003$ град. Изменение температуры во время измерений вносило погрешность не более $\pm 0,005$ град для куба 100 мм и $\pm 0,002$ град для куба 72 мм; наличие же градиентов температуры вносило погрешность не более $\pm 0,006$ град. Таким образом, предельная погрешность измерения температуры кубов составляла соответственно $\pm 0,014$ и $\pm 0,011$ град. Это привело к погрешности измерения Δ_α , меньшей $\pm 0,001$ мкм, для обоих кубов.

Температурный коэффициент удлинения плавленого кварца, из которого изготовлены кубы, равный $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, определен с предельной погрешностью $\pm 0,05 \cdot 10^{-6}$ град [6]. Максимальное отклонение температуры куба 100 мм от 20°C составляло 2 град, что привело к максимальной погрешности измерения Δ_α , равной $\pm 0,01$ мкм. Отклонение температуры куба 72 мм от 20°C достигало всего 0,2 град, поэтому и погрешность определения Δ_α для него была меньше $\pm 0,001$ мкм.

Полагая в этом случае распределение погрешностей равновероятным, среднюю квадратическую погрешность определения Δ_α получаем для куба 100 мм равной [5]

$$\sigma_\alpha \approx 0,006 \text{ мкм},$$

а для куба 72 мм

$$\sigma_\alpha \leq 0,001 \text{ мкм}.$$

Третье слагаемое суммы (1) представим в виде

$$\Delta_\lambda = 10^{-9} l [0,361 (760 - p) - 0,938 (20 - t) - 0,054 (10 - f)] \text{ мкм},$$

где l — измеряемая длина, м.

Полагая предельные погрешности измерения давления p и влажности воздуха f равными $\pm 0,1$ мм рт. ст., температуры t кубов 100 и 72 мм соответственно $\pm 0,014$ и $\pm 0,011$ град и распределение их равновероятным, среднюю квадратическую погрешность определения Δ_λ для куба 100 мм получаем равной

$$\sigma_\lambda \approx 0,0024 \text{ мкм},$$

а для куба 72 мм

$$\sigma_\lambda \approx 0,0017 \text{ мкм}.$$

Поправку Δ_0 подсчитываем по формуле

$$\Delta_0 = \frac{a^2 + b^2}{25F^2} l,$$

где a и b — размеры прямоугольной диафрагмы входной щели интерферометра;

F — фокусное расстояние объектива коллиматора интерферометра.

Измерить размеры щели с такой точностью, чтобы погрешность определения поправки была много меньше погрешностей других поправок, не составляет труда.

В итоге средняя квадратическая погрешность измерений длины перпендикуляров равна для куба 100 мм

$$\sigma_{100} \approx 0,011 \text{ мкм},$$

а для куба 72 мм

$$\sigma_{72} \approx 0,009 \text{ мкм}.$$

Непривычно большие размеры и вес кубов по сравнению с размерами поперечных сечений и весом концевых мер из плавленого кварца, «завалы» поверхностей граней на краях и особенно вблизи углов кубов, а также неблагоприятные температурные условия не позволили произвести измерения с наивысшей возможной точностью для 100-мм мер ($\sigma = 0,007$ мкм) [7].

При притирке куба 72 мм противоположными гранями $B_1A_2B_4A_1$ и $B_2A_3B_3A_4$ одни и те же перпендикуляры были измерены дважды, например вдоль ребра B_2 в направлении $1-10$ и вдоль ребра B_1 в направлении $10-1$. Расхождения результатов этих двух измерений от среднего между ними для всех 40 перпендикуляров примерно равны $\pm 0,014$ мкм, что составляет $\pm 1,5\sigma_{72}$ и вполне допустимо для двух измерений не только с разной, но и с одной и той же притиркой.

Таблица 3

Результаты измерений центральных углов

Грани поверяемого куба	Действительные значения центральных углов	Грани поверяемого куба	Действительные значения центральных углов
Куб 72 мм			
2—6	90°00'01",40	4—6	89°59'59",49
6—5	89°59'57",38	6—1	89°59'59",69
5—3	90°00'03",72	1—5	90°00'01",30
3—2	89°59'57",51	5—4	89°59'59",94
1—3	89°59'59",74	4—2	89°59'58",94
3—4	90°00'01",08	2—1	89°59'59",82
Куб 100 мм			
1—2	90°00'03",64	6—4	89°59'59",46
2—3	89°59'56",22	4—5	90°00'00",50
3—4	90°00'04",38	1—6	90°00'06",10
4—1	89°59'55",76	6—3	89°59'53",08
5—2	89°59'59",04	3—5	90°00'07",20
2—6	90°00'00",98	5—1	89°59'53",63

Центральные углы кварцевых кубов измеряли на эталонной автоколлимационной установке ВНИИМ, служащей для воспроизведения единицы плоского угла абсолютным методом [8].

Эта установка состоит из двух автоколлиматоров типа АКМ-1000 и поворотного устройства со столом, на котором помещают исследуемые многогранные призмы или другие образцовые меры. Установка смонтирована на чугунной плите, расположенной на специальном фундаменте. Один из автоколлиматоров укреплен неподвижно на плите, а второй перемещается по дуге-сектору вокруг поворотного устройства.

Таблица 4

Обозначения граней кубов на рисунке

Номера граней	Куб	
	72 мм	100 мм
1	$B_3C_3B_4C_4$	$B_2C_2B_4C_4$
2	$A_1B_4A_2B_1$	$A_1B_4A_2B_1$
3	$A_1C_1A_4C_4$	$B_1C_2B_2C_1$
4	$B_1C_2B_2C_1$	$B_2A_3B_3A_4$
5	$A_3B_3A_4B_2$	$A_2C_3A_3C_2$
6	$A_2C_2A_3C_2$	$A_1C_1A_4C_4$

Автоколлиматоры имеют линзовые телеобъективы с фокусным расстоянием 1000 мм и трубу длиной около 600 мм. Отсчетное устройство представляет собой оптические окулярные микрометры. Цена наименьшего деления секундной шкалы микрометра неподвижного автоколлиматора $0,2518''$, у подвижного $0,2556''$. Предел измерения по шкале автоколлиматоров составляет $6'$.

Метод калибровки, которым измеряли углы кубов, основан на последовательном измерении одного или нескольких центральных углов с помощью двух автоколлиматоров (результаты приведены в табл. 3). Для каждого куба было выполнено по 20 приемов измерений (по три отсчета) для серии углов 90° . Каждый прием включал прямой и обратный ходы. Грани кубов при измерении углов между ними обозначали цифрами от 1 до 6. Номера граней и их обозначения согласно рисунку приведены в табл. 4. Средняя квадратическая погрешность измерений для обоих кубов — порядка $\pm 0,18''$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьменков Л. Н. Абсолютные измерения плотности ртути. «Приборы и средства автоматизации», 1966, № 5.
2. Procès — verbaux des seances 2 serie 31, 52^e session, 1963, p. 77.
3. V a n n e l l H. The Dispersion of Air Between 250 Å and 6500 Å JOSA. 1951, v. 41, № 5.
4. E d l e n B. The Dispersion of Standard Air JOSA. 1953, v. 43, № 5.
5. Рабинович Б. Е. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. «Труды институтов Комитета», вып. 57 (117). М.—Л., Стандартгиз, 1962.
6. Королева А. Н. Интерференционный dilatометр. «Труды институтов Комитета», вып. 71 (131). М.—Л., Стандартгиз, 1963.
7. Алексеева Е. П., Шошина О. Ю. Сравнение интерференционных установок институтов Комитета. «Труды институтов Комитета», вып. 47 (107). М.—Л., Стандартгиз, 1961.
8. Гречко М. Ф., Смирнова Л. И., Стракуи Г. И., Шарова Е. Е. Эталонная установка для измерения углов. «Труды институтов Комитета», вып. 47 (107). М.—Л., Стандартгиз, 1961.

Поступила в редакцию 19/1 1967 г.

**О ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛИРУЮЩИХ УСТАНОВОК
ДЛЯ УЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
НЕКОТОРЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Как известно, преимущества математического моделирования определяются тем, что большое число разнообразных по своей физической природе динамических систем может быть описано одинаковыми по форме математическими выражениями. Так, например, в системах, приведенных на рис. 1, взаимосвязь величин

$$U \rightarrow U_L, F \rightarrow a, U_{вх} \rightarrow U_{вых}$$

(U — напряжение источника, U_L — напряжение на индуктивности, F — сила, a — ускорение и $U_{вх}$, $U_{вых}$ — входное и выходное напряжения

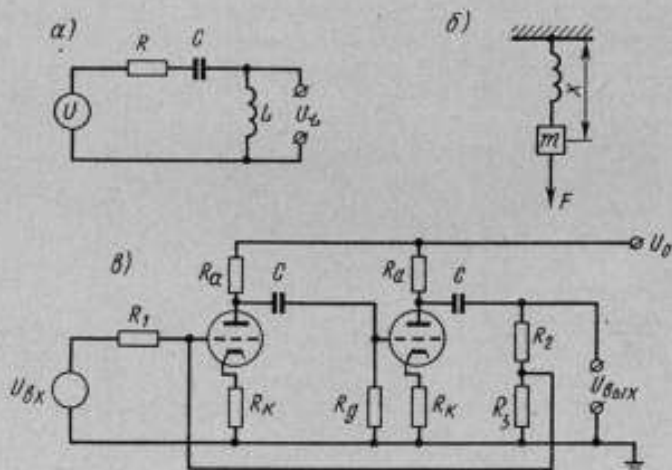


Рис. 1. Примеры подобных динамических систем:
а — пассивная электрическая LCR-цепь; б — масса, подвешенная на пружине; в — усилитель с положительной обратной связью.

усилителя с положительной обратной связью) описывается по существу одним и тем же дифференциальным уравнением

$$A_1 \frac{d^2 y}{dt^2} + A_2 \frac{dy}{dt} + 1 = A_1 \frac{d^2 z}{dt^2}. \quad (1)$$

Так, на рис. 1, а

$$y = U_L, z = u, A_1 = LC, A_2 = RC,$$

где C — емкость,

на рис. 1,б

$$y = \frac{a}{a_0} = a \frac{m}{F_0}, \quad z = \frac{F}{F_0}, \quad A_1 = \frac{m}{K}, \quad A_2 = \frac{\eta}{K},$$

где a_0 и F_0 — постоянные значения ускорения и силы, принятые за единицу измерения;

m — масса;

K и η — коэффициенты упругости пружины и вязкого трения; на рис. 1,в

$$y = U_{\max}, \quad z = U_{\max} \frac{K}{1 - K\beta},$$

$$A_1 = \tau_1 \tau_2 (1 - K\beta), \quad A_2 = \tau_1 + \tau_2.$$

Здесь $K = \left(\frac{\mu R_a}{R_a + R_l + (1 + \mu) R_k} \right)^2$ — коэффициент усиления усилителя; μ , R_l — коэффициент усиления и внутреннее сопротивление лампы;

R_a и R_k — анодное и катодное сопротивления;

$\tau_1 = CR_g$; $\tau_2 = C \left(R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} \right)$ — постоянные времени;

R_g — сеточное сопротивление;

$\beta = \frac{R_1 R_3}{R_1 R_3 + R_1 R_2 + R_2 R_3}$ — коэффициент обратной связи.

Последние выражения получены при условии $R_g \gg R_a$, что обычно отвечает действительности.

Величины A_1 и A_2 часто называют критериями подобия, так как при их равенстве различные системы оказываются подобными в отношении изменения переменных величин, входящих в уравнение (1).

Для систем, приведенных на рис. 1, существует область параметров, при которых они подобны. Чтобы получить результаты, справедливые для всего класса подобных систем, достаточно исследовать одну из этих систем, которая будет называться моделью для данного класса, а соответствующий метод исследования — моделированием. В качестве моделей удобнее всего использовать электрические схемы. Широкий класс динамических систем с сосредоточенными параметрами может быть промоделирован с помощью электрических схем, построенных из небольшого числа стандартных блоков. Этот принцип положен в основу современных электронных моделирующих установок. Важнейшим блоком большинства из таких установок в настоящее время является блок, построенный по схеме, показанной на рис. 2. Для этой схемы справедливо выражение

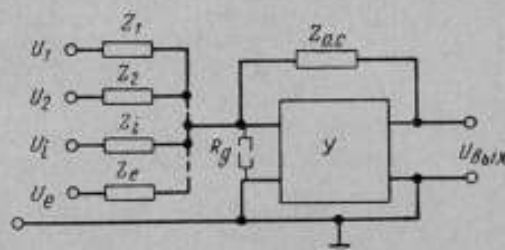


Рис. 2. Схема включения операционного усилителя.

$$U_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^l U_i G_i}{G + G_{o.c.}}, \quad (2)$$

где l — число входов;

K_n — коэффициент усиления усилителя постоянного тока;

$$G_i = \frac{1}{Z_i}, \quad G_{o.c} = \frac{1}{Z_{o.c}}, \quad G = \sum_{i=1}^l \frac{1}{Z_i} + \frac{1}{R_g} + \frac{1}{Z_{o.c}};$$

Z_1, \dots, Z_l — входные сопротивления;
 $Z_{o.c}$ — сопротивление обратной связи.

Усилитель Y имеет нечетное число каскадов, так что он поворачивает фазу входного напряжения на 180° . Это необходимо для того, чтобы получить отрицательную обратную связь. Так как коэффициент усиления

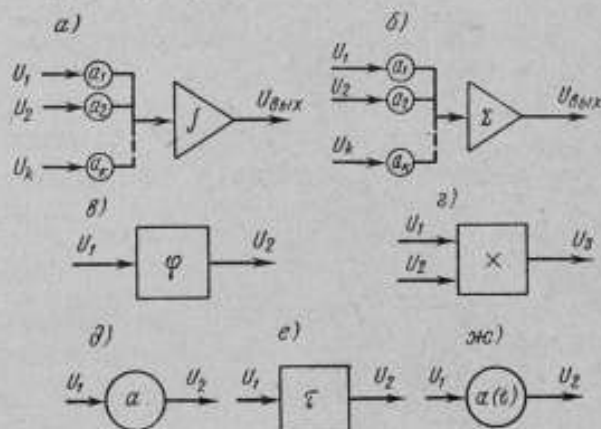


Рис. 3. Условные обозначения элементов схем математического моделирования: а — интегрирующий блок; б — сумматор, в — величинный блок, г — блок умножения, д — постоянный коэффициент, е — звено запаздывания, ж — переменный коэффициент.

очень большой, $K_n \approx 10^6$, то в выражении (2) отношением G/K_n , как величиной малой, можно пренебречь по сравнению с $G_{o.c}$. Таким образом,

$$U_{\text{вых}} \approx U_1 \frac{Z_{o.c}}{Z_1} + \dots + U_l \frac{Z_{o.c}}{Z_l}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что блок, изображенный на рис. 2, суммирует входные напряжения с коэффициентами, равными отношению сопротивлений обратной связи к соответствующему входному сопротивлению.

Если в обратную связь включена емкость C , а входные сопротивления являются активными, то

$$U_{\text{вых}}(p) = \frac{U_1(p)}{R_1 C p} + \dots + \frac{U_l(p)}{R_l C p}$$

или

$$U_{\text{вых}}(t) = \int_{t_0}^t \left(\frac{U_1(t)}{R_1 C} + \dots + \frac{U_l(t)}{R_l C} \right) dt,$$

где p — комплексная переменная в преобразовании Лапласа;
 t — текущее время.

Таким образом, блок, изображенный на рис. 2, при включении вместо $Z_{o.c}$ конденсатора выполняет операцию интегрирования.

Наряду с блоками интегрирования и суммирования (рис. 3, а и б), которые одновременно являются и блоками, изменяющими знак входного напряжения (инверторами), в современных моделирующих установках

используют следующие блоки (рис. 3): нелинейные (а), перемножения (з), постоянных коэффициентов (д), запаздывания (е), блок переменных коэффициентов (ж).

В моделях могут быть использованы также элементы, реализующие типовые нелинейности, и логические элементы. Ряд моделирующих установок (например, ЭМУ-10) снабжены специальным блоком-оптимизатором, автоматически настраивающим коэффициенты модели по заданному критерию оптимизации. Моделирующие установки обычно легко могут быть оснащены всевозможной дополнительной аппаратурой. Отечественная промышленность выпускает моделирующие установки (аналоговые вычислительные машины) различных типов. Так, например, малогабаритная машина МН-7 предназначена для решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений до 6-го порядка, а более крупная модель МН-14 — до 30-го порядка. Результаты решения регистрируются осциллографом, самопишущими или другими приборами.

На рис. 4* проиллюстрирован принцип составления схемы для решения дифференциального уравнения

$$a_2 \ddot{U}_1 + a_1 \dot{U}_1 + a_0 U_1 = U_2,$$

где

$$\dot{U}_1 = \frac{dU_1}{dt}, \quad U_2 = A \cos \omega t;$$

ω — угловая частота.

Функцию $U_2 = A \cos \omega t$ получают в результате решения дифференциального уравнения

$$\ddot{U}_2 + \omega^2 U_2 = 0$$

при

$$U_2(0) = A, \quad \dot{U}_2(0) = 0.$$

Динамическую систему \hat{W} , соответствующую измерительному прибору, можно условно представить, как показано на рис. 5. Погрешность прибора равна

$$\Delta U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}} - U_{\text{изм}},$$

где $U_{\text{пр}}$ — показания прибора;

$U_{\text{изм}}$ — действительное значение измеряемой величины.

При динамических режимах измерения эта погрешность обычно увеличивается вместе с увеличением частоты изменения $U_{\text{изм}}$. Чтобы вычислить необходимую поправку к показаниям прибора, нужно знать уравнения, описывающие связь $U_{\text{изм}} \rightarrow U_{\text{пр}}$.

Пусть, например, зависимость $U_{\text{изм}} \rightarrow U_{\text{пр}}$ описывается некоторым дифференциальным уравнением k -го порядка

$$\varphi(U_{\text{пр}}^{(k)}, \dots, U_{\text{пр}}, a_k, a_{k-1}, \dots, a_0, U_{\text{изм}}) = 0, \quad (4)$$

где $U_{\text{пр}}^{(k)} = \frac{d^k U_{\text{пр}}}{dt^k}$.

Предположим, что в результате исследования измерительного прибора удалось определить коэффициенты a_0, \dots, a_k с погрешностями $\pm \Delta a_0, \dots, \pm \Delta a_k$.

* Для более детального ознакомления с техникой моделирования можно обратиться к книге Л. Левина «Методы решения технических задач с использованием аналоговых вычислительных машин». М., изд. «Мир», 1966.

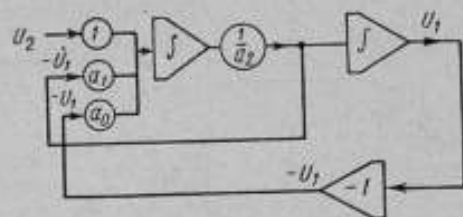
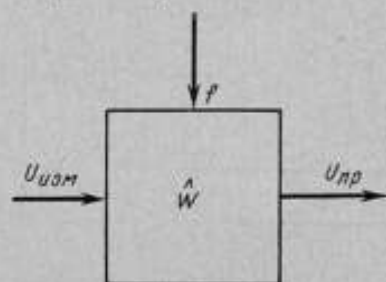


Рис. 4. Схема моделирования уравнения $a_2 \ddot{U}_1 + a_1 \dot{U}_1 + a_0 U_1 = U_2$.

В практически важных случаях уравнение (4), как правило, оказывается настолько сложным, что необходимые вычисления можно провести только с помощью вычислительных устройств. При этом возникает дополнительная погрешность, связанная с неточностью работы этих устройств. Для аналоговых вычислительных машин она составляет 0,5—5% в зависимости от сложности задачи.

Представляют интерес следующие вопросы: с какой точностью нужно знать коэффициенты уравнения связи и с какой точностью должно работать вычислительное устройство, чтобы можно было получить эффективную поправку к показаниям измерительного прибора. В сложных случаях ответить на эти вопросы можно только с помощью эксперимента. Ниже на простом примере показано, что иногда эффективную поправку можно получить при относительно невысоких требованиях к точности математического описания и вычислительного устройства.

Пусть связь $U_{изм} \rightarrow U_{пр}$ описывается уравнениями:



$$\left. \begin{aligned} U_{изм} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_1 - a_0) dt}; \\ U_{пр} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (U_2 - a_0) dt}; \end{aligned} \right\} (5)$$

$$\tau \dot{U}_2 + U_2 = U_1;$$

$$U_1 = a_0 + a_1 \sin \omega t;$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Рис. 5. Условное обозначение динамической системы измерительного прибора.

f — возмущающее воздействие, например, вибрация.

В каждом режиме измерения a_0 и a_1 сохраняются постоянными. Из выражений (5) находим

$$U_{пр} = \frac{U_{изм}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}.$$

Предположим, что неточность математического описания вызвана погрешностью $\pm \Delta\tau$ определения постоянной времени τ . Тогда для оценки приведенных погрешностей показаний измерительного прибора без учета ε_1 и с учетом ε_2 поправки получим неравенства

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &\leq 1 + \frac{\Delta_1}{U_{изм \max}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}; \\ \varepsilon_2 &\leq \sqrt{\frac{1 + \omega^2 \tau^2 \left(1 + \frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2}{1 + \omega^2 \tau^2}} - \frac{\Delta_2 \sqrt{1 + \omega^2 \tau^2 \left(1 + \frac{\Delta\tau}{\tau}\right)^2}}{U_{изм \max}} - 1, \end{aligned} \right\} (6)$$

где Δ_1 — абсолютные случайные погрешности показаний измерительного прибора;

$\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_3$ (Δ_3 — абсолютная погрешность, связанная с неточностью установки величины $U_{пр}$ на вычислительном устройстве).

Зависимости ε_1 и ε_2 от частоты, вычисленные по формулам (6) в случае знака равенства для различных значений $\Delta_1/U_{изм \max}$, $\Delta_2/U_{изм \max}$ и $\Delta\tau/\tau$, приведены на рис. 6, на котором кривым 1 (ε_1) и 4 (ε_2) соответствуют условия $\Delta_2/U_{изм \max} = 0,1$, $\Delta_1/U_{изм \max} = 0,05$, $\Delta\tau/\tau = 0,1$; кривым 2 (ε_1)

- где m — масса измерительного стержня и жестко связанных с ним деталей;
 F_a — сила, приложенная к измерительному стержню в точке a (для простоты будем считать, что F_a вызвана только упругой деформацией);
 F_b — равнодействующая сил, приложенных к измерительному стержню в точках b (будем считать, что F_b обусловлена сухим и вязким трением);
 F_c — сила, действующая на измерительный стержень со стороны пружины;
 F_d — сила трения, возникающая во фрикционной паре;
 α — угол поворота системы передаточного рычага от нейтрального положения;
 G — момент инерции системы, жестко связанной с передаточным рычагом;
 F_e, F_f — силы, возникающие при соударении контактных пар вследствие упругой деформации;
 M — момент сил трения, действующих на систему передаточного рычага;

x_2, r_1, r_2 — расстояния, показанные на рис. 7.

Знак минус в выражении (8) означает, что F_e и F_f действуют в противоположных направлениях.

Напишем выражения для сил и моментов, входящих в уравнения (7) и (8):

$$\left. \begin{aligned} F_a &= 0 \text{ при } x_2 - x_1 - l_1 \geq 0, \\ F_a &= k_1(x_1 + l_1 - x_2) \text{ при } x_2 - x_1 - l_1 < 0, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от упругости системы измерительный стержень — деталь;

x_1, l_1 — размеры деталей в недеформированном состоянии, показанные на рис. 7.

Производя замену

$$x_2 = x_1 + l_1 + \Delta x_2, \quad (10)$$

получим вместо выражений (9)

$$\left. \begin{aligned} F_a &= 0 \text{ при } \Delta x_2 \geq 0, \\ F_a &= -k_1 \Delta x_2 \text{ при } \Delta x_2 < 0. \end{aligned} \right\} \quad (9')$$

Равнодействующая сил F_b определяется выражением

$$F_b = F_b' + F_b'' \quad (11)$$

где F_b' и F_b'' — силы, обусловленные сухим и вязким трением соответственно:

$$\left. \begin{aligned} F_b' &= -F_{bc} \text{ при } \dot{x}_2 > 0, \\ F_b' &= F_{bc} \text{ при } \dot{x}_2 < 0, \\ F_b' + F_b'' + F_a + F_c + F_d &= 0 \text{ при } \dot{x}_2 = 0 \text{ и } F_b' + F_a + F_c + F_d < F_{bn}, \\ F_b' &= -F_{bn} \text{ при } F_b' + F_a + F_c + F_d \geq F_{bn} \text{ и } \dot{x}_2 = 0, \\ F_b' &= F_{bn} \text{ при } F_b' + F_a + F_c + F_d \leq -F_{bn} \text{ и } \dot{x}_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Здесь F_{bc}, F_{bn} — силы трения скольжения и покоя соответственно,

$$\dot{x}_2 = \frac{dx_2}{dt}.$$

Запишем выражение для F_b^* :

$$F_b^* = -k_2 \dot{x}_2, \quad (13)$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности.

Перейдем от величин x_1 и x_2 к приращениям

$$x_1 = x_{10} + \Delta x_1, \quad (14)$$

$$x_2 = x_{10} + l_1 + \Delta x_2. \quad (15)$$

Здесь x_{10} — номинальный размер x_1 .

Подставив в выражение (10) значения x_1 и x_2 из выражений (14) и (15), получим

$$\Delta x_2' = \Delta x_2 - \Delta x_1. \quad (10')$$

Сила

$$F_c = -F_{c0} - k_3 \Delta x_2, \quad (16)$$

где k_3 — коэффициент пропорциональности,

F_{c0} — сила натяжения пружины при $x_2 = x_{10} + l_1$.

Выведем выражения для силы F_d :

$$\left. \begin{aligned} F_d &= -F_{dc} \text{ при } r_1 \dot{\alpha} + \dot{x}_2 > 0, \\ F_d &= F_{dc} \text{ при } r_1 \dot{\alpha} + \dot{x}_2 < 0, \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

где F_{dc} — сила трения скольжения и $\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt}$.

При $r_1 \dot{\alpha} + \dot{x}_2 = 0$ могут быть те же случаи, что и в формулах (12). После несложных преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} F_d &= -F_{d1} \text{ при } |F_{d1}| \leq F_{dn}, \\ F_d &= -F_{dn} \text{ при } F_{d1} > F_{dn}, \\ F_d &= F_{dn} \text{ при } F_{d1} < -F_{dn}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Здесь F_{dn} — сила трения покоя.

Для силы F_{d1} найдем

$$F_{d1} = \frac{(F_a + F_b + F_c)G + (r_2 F_e - r_1 F_f + M)r_3 m}{mr_1^2 + G}, \quad (19)$$

$$\left. \begin{aligned} F_e &= 0 \text{ при } r_2 \alpha + l_2 \geq 0, \\ F_e &= -k_4 (r_2 \alpha + l_2) \text{ при } r_2 \alpha + l_2 < 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Аналогично:

$$\left. \begin{aligned} F_f &= 0 \text{ при } l_3 - r_2 \alpha \geq 0, \\ F_f &= -k_5 (l_3 - r_2 \alpha) \text{ при } l_3 - r_2 \alpha < 0, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

k_4 и k_5 — коэффициенты пропорциональности, характеризующие упругость соударяющихся элементов.

Считая, что на систему передаточного рычага (рис. 7) действуют силы вязкого трения, запишем

$$M = -k_6 \dot{\alpha}, \quad (22)$$

где k_6 — коэффициент пропорциональности.

Учитывая, что

$$\dot{x}_2 = \Delta \dot{x}_2, \quad (23)$$

получим замкнутую математическую модель, описывающую динамику системы, изображенной на рис. 7. Модель включает уравнения: (7), (8), (9'), (11), (12), (13), (10'), (16)—(23).

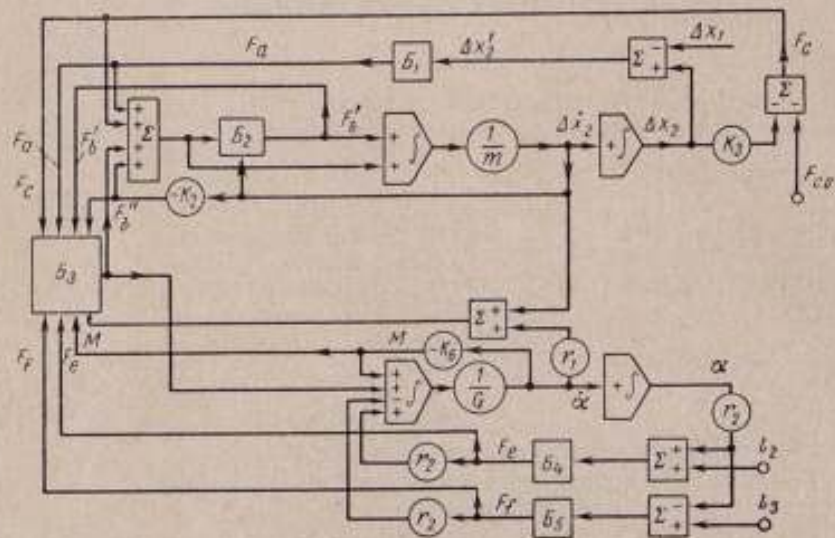


Рис. 8. Общая схема математического моделирования уравнений динамики датчика модели 231.

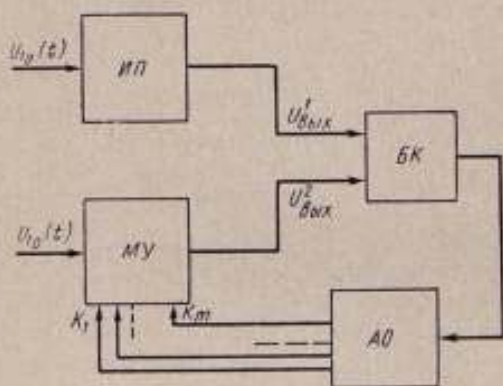


Рис. 9. Схема автоматической настройки коэффициентов модели: ИП — измерительный прибор; БК — блок вычисления критерия Φ ; АО — автоматический оптимизатор; МУ — моделирующая установка.

Рис. 10. Схема автоматического определения параметров, характеризующих входную величину измерительного прибора.

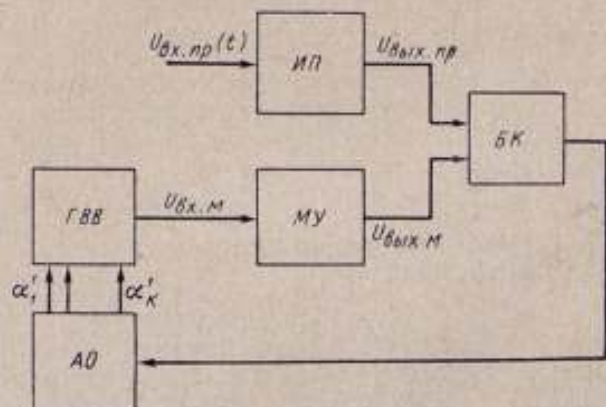


Схема математического моделирования показана на рис. 8. На этом рисунке наряду с принятыми обозначениями для интегрирующих, суммирующих блоков и блоков постоянных коэффициентов приведены блоки B_1 — B_5 , соответствующие отдельным подсхемам, входящим в основную схему. Блоки B_1 , B_2 , B_4 и B_5 моделируют соответственно зависимости (9'), (12), (20) и (21), а B_3 — зависимости (17), (18) и (19).

После того как математическая модель построена, возникают две основные задачи:

1) идентификация модели и измерительного прибора путем соответствующей настройки коэффициентов модели;

2) определение измеряемой величины путем экспериментов на модели.

Принцип решения первой задачи проиллюстрирован на рис. 9. На вход измерительного прибора *ИП* действует известная величина $U_{10}(t)$.

Такая же величина поступает на вход моделирующей установки *МУ*. Считывающее устройство преобразует выходную величину прибора в ту же форму, в которой представлена соответствующая величина на модели. Эти величины сравнивают по какому-либо подходящему критерию Φ , например по среднему квадратическому отклонению, усредненному за период. Автоматический оптимизатор *АО* изменяет коэффициенты модели до тех пор, пока критерий Φ не достигнет минимума. Так как наряду с абсолютным минимумом Φ могут существовать локальные экстремумы, то для успешной автоматической настройки необходимо заранее с максимальной возможной точностью установить все коэффициенты модели. Последние желательно настраивать, выбрав входную величину по возможности близкой к тем, которые в дальнейшем могут встретиться в режимах измерения.

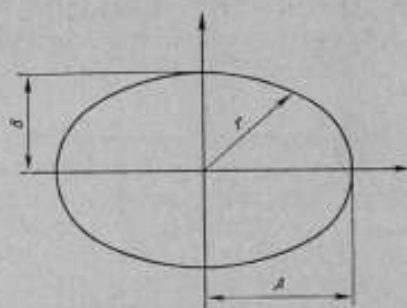


Рис. 11. Измеряемая деталь, форма которой характеризуется двумя параметрами A и B .

После настройки коэффициентов вторая задача может быть решена автоматически; принцип ее решения показан на рис. 10.

Предполагается, что входная величина измерительного прибора $U_{вх. пр}$ может быть с достаточной степенью точности охарактеризована группой параметров $\alpha_1, \dots, \alpha_k$. Если, например, вращающаяся измеряемая деталь имеет форму эллипса (рис. 11), то

$$U_{вх. пр}(t) = r(t) = \sqrt{A^2 \sin^2 \omega t + B^2 \cos^2 \omega t},$$

где t — время, сек; $\omega = 2\pi n$;

n — число оборотов в секунду.

В данном случае $U_{вх. пр}$ полностью определяется параметрами A и B .

Для определения $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ моделирующую установку дополняют блоком *ГВВ*, генерирующим входную величину $U_{вх. м}$ (рис. 10). Блок *ГВВ* имеет изменяемые коэффициенты $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ и может быть собран из элементов моделирующей установки или выполнен в виде отдельного устройства. Оптимизатор настраивает коэффициенты блока до тех пор, пока не будет достигнут минимум критерия Φ , по которому сравнивают выходные величины $U_{вых. пр}$ и $U_{вых. м}$. Полученные значения $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ соответствуют расчетному значению измеряемой величины. Как уже было отмечено, в ряде случаев вычисленная таким путем динамическая поправка может оказаться эффективной.

Поступила в редакцию 3/11/1967 г.

ВЛИЯНИЕ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ОТ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО НАКОНЕЧНИКА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

На точность измерений длины приборами с ценой деления менее 0,1 мкм могут существенно влиять шероховатость измеряемой поверхности, вибрации, колебание температуры, измерительное усилие и т. п. Для этих приборов возрастает необходимость учета указанных факторов. Рассмотрим влияние измерительного усилия на точность измерений.

Как известно, погрешность от измерительного усилия возникает и зависит в наибольшей степени от контактных деформаций в точке соприкосновения измерительного наконечника с измеряемой деталью и от деформаций стоек и штативов, на которых закреплены измерительные приборы.

Установлено [1], что у большинства стандартных стоек деформации при нагрузках до 0,5 н малы, и ими можно пренебречь. Однако уже при нагрузках в 1,0 н даже для наиболее жесткой стойки типа С-1 деформации достигают 0,1 мкм, с чем следует считаться при измерениях приборами с ценой деления менее 0,1 мкм.

Определим условия, когда влиянием деформаций стоек на точность измерений можно пренебречь. В случае абсолютных измерений для этого достаточно установить максимальное измерительное усилие не более 0,5 н. При относительных же измерениях необходимо, чтобы изменение этого усилия, когда измерительный наконечник перенесен с меры на измеряемую деталь, не превосходило 0,5 н, при этом не имеет значения, каково максимальное измерительное усилие.

Несколько сложнее обстоит дело с погрешностями от контактных деформаций. Контактную деформацию δ (мм) для случая контакта сферической поверхности с плоскостью можно подсчитать по формуле Герца, которая справедлива в пределах упругой деформации:

$$\delta = 0,825 \sqrt[3]{\frac{P\tau}{R} \left[\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right]^2}, \quad (1)$$

где

P — измерительное усилие;

R — радиус сферической поверхности измерительного наконечника, мм;

μ_1, μ_2 и E_1, E_2 — коэффициенты Пуассона и модули упругости материалов контактируемых поверхностей.

По данным работы [2], значения контактных деформаций, рассчитанные по формуле Герца, на 9—16% меньше полученных экспериментально. Как показано в работе [3], при больших усилиях также наблюдались

расхождения до 16% между экспериментальными и расчетными значениями контактной деформации, однако при малых усилиях до 4,0 н совпадение было хорошим. Для большинства приборов для измерения длин измерительное усилие не превосходит 4,0 н, поэтому на практике для расчета контактных деформаций вполне можно пользоваться формулой Герца.

В таблице приведены рассчитанные по формуле Герца значения контактной деформации для различных материалов при использовании стандартных стальных наконечников (ГОСТ 11007-64). Как видно из таблицы, для приборов с ценой деления менее 0,1 мкм существенными будут контактные деформации даже при усилиях 0,01 н. При цене деления 0,05 мкм для наконечников с минимальным и максимальным радиусами сферы контактные деформации для стальных деталей составляют соответственно 25 и 11% от цены деления. С увеличением усилия деформации возрастают, и при усилнии 0,07 н для наконечника с радиусом сферы 1,6 мм деформация равна цене деления. Для материалов с модулем упругости меньшим, чем для стали, погрешности будут соответственно больше (см. таблицу).

Контактные деформации δ (мкм) для различных материалов при использовании измерительных наконечников из стали ($E = 2,2 \cdot 10^5$ н/мм², $\mu = 0,3$)

Материал измеряемой детали	Радиус сферы наконечника R, мм	Измерительное усилие P, н									
		0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
Сталь $E=2,2 \times 10^5$ н/мм ² , $\mu=0,3$	1,6	0,013	0,021	0,039	0,062	0,099	0,18	0,29	0,46	0,60	0,73
	5,0	0,009	0,014	0,027	0,043	0,068	0,13	0,20	0,31	0,41	0,50
	10,0	0,007	0,012	0,021	0,034	0,054	0,099	0,16	0,25	0,33	0,40
	14,0	0,007	0,010	0,019	0,030	0,048	0,088	0,14	0,22	0,29	0,354
	20,0	0,006	0,009	0,017	0,027	0,043	0,078	0,124	0,197	0,26	0,314
Латунь или бронза $E=10^5$ н/мм ² , $\mu=0,3$	1,6	0,018	0,029	0,053	0,084	0,133	0,244	0,388	0,615	0,81	0,98
	5,0	0,012	0,020	0,036	0,057	0,091	0,167	0,265	0,42	0,55	0,67
	10,0	0,010	0,016	0,029	0,046	0,072	0,133	0,211	0,335	0,44	0,53
	14,0	0,009	0,014	0,026	0,041	0,064	0,118	0,188	0,298	0,39	0,474
	20,0	0,008	0,012	0,023	0,036	0,057	0,105	0,167	0,265	0,35	0,42
Алюминиевый сплав $E=0,72 \times 10^5$ н/мм ² , $\mu=0,3$	1,6	0,021	0,034	0,063	0,10	0,158	0,29	0,46	0,73	0,96	1,16
	5,0	0,015	0,023	0,043	0,068	0,108	0,20	0,32	0,51	0,66	0,80
	10,0	0,012	0,019	0,034	0,054	0,086	0,16	0,25	0,40	0,53	0,64
	14,0	0,01	0,017	0,031	0,049	0,077	0,142	0,225	0,36	0,47	0,57
	20,0	0,009	0,015	0,027	0,043	0,068	0,125	0,20	0,32	0,42	0,50

Покажем, как контактная деформация может повлиять на результаты поверки прибора при определении погрешности его показаний по концевым мерам длины.

Погрешность прибора $\Delta_{пр}$ можно определить по формуле

$$\Delta_{пр} = l_u - l_{пр} - \delta, \quad (2)$$

где $l_{ик}$ — разность номинальных размеров концевых мер, используемых для поверяемого участка шкалы;

$l_{пр}$ — отклонение стрелки прибора при переносе измерительного наконечника с одной меры на другую.

Как видно из формулы (2), от учета δ зависит правильность определения предельной погрешности прибора. Например, для оптикатора типа ОП с ценой деления 0,0001 мм допускаемое измерительное усилие равно 1,5 н, а его колебание 0,3 н [4]. Такому колебанию измерительного усилия для наконечника с радиусом сферы 1,6 мм соответствует контактная деформация, равная 0,05 мкм.

Аналогично рассмотренному случаю контактная деформация влияет на точность относительных измерений. Следует отметить, что при этом погрешности от нее будут тем больше, чем больше разница между модулями упругости материалов сравниваемых деталей.

На основании сказанного можно заключить, что измерительное усилие и его колебания вызывают весьма существенные погрешности, причем чем меньше цена деления прибора, тем большее влияние будут иметь эти погрешности на точность измерений.

Для приборов с ценой деления более 1,0 мкм указанными погрешностями пренебрегают или, в лучшем случае, стараются уменьшить колебание измерительного усилия, тем самым доводя погрешности измерения до значений, значительно меньших допускаемых, что позволяет пренебречь ими. В некоторых случаях для стабилизации или уменьшения



Рис. 1. Зависимость контактных деформаций от радиуса сферы измерительного наконечника для стальной детали.

измерительного усилия применяют различные устройства. Однако эти устройства сами обладают определенными погрешностями и полностью не могут устранить влияние измерительного усилия на точность измерений. Для уменьшения контактных деформаций часто применяют измерительные наконечники с большим радиусом сферической поверхности. Однако это незначительно уменьшает контактную деформацию. Как видно из рис. 1, при больших усилиях зависимость контактной деформации от радиуса сферы сильнее, чем при малых усилиях. Отсюда можно заключить, что при больших измерительных усилиях для уменьшения контактной деформации следует применять наконечники с большим радиусом сферы. При малых измерительных усилиях можно пользоваться любым наконечником, поскольку контактные деформации практически не зависят от радиуса сферы, однако лучше применять наконечники с меньшим радиусом, что уменьшает влияние на точность измерений загрязненности измеряемой поверхности и микронеровностей.

Таким образом, уменьшение как измерительного усилия, так и его колебания до нескольких сотых ньютона (что практически трудно осуществимо) не решает вопроса об уменьшении погрешностей от этого усилия

для приборов с ценой деления менее 0,1 мкм. Не решает его и увеличение радиуса сферической поверхности измерительного наконечника.

Погрешности от контактной деформации являются систематическими, и их можно исключить, внося в результат измерения контактным прибором поправку. Значение контактной деформации в зависимости от измери-

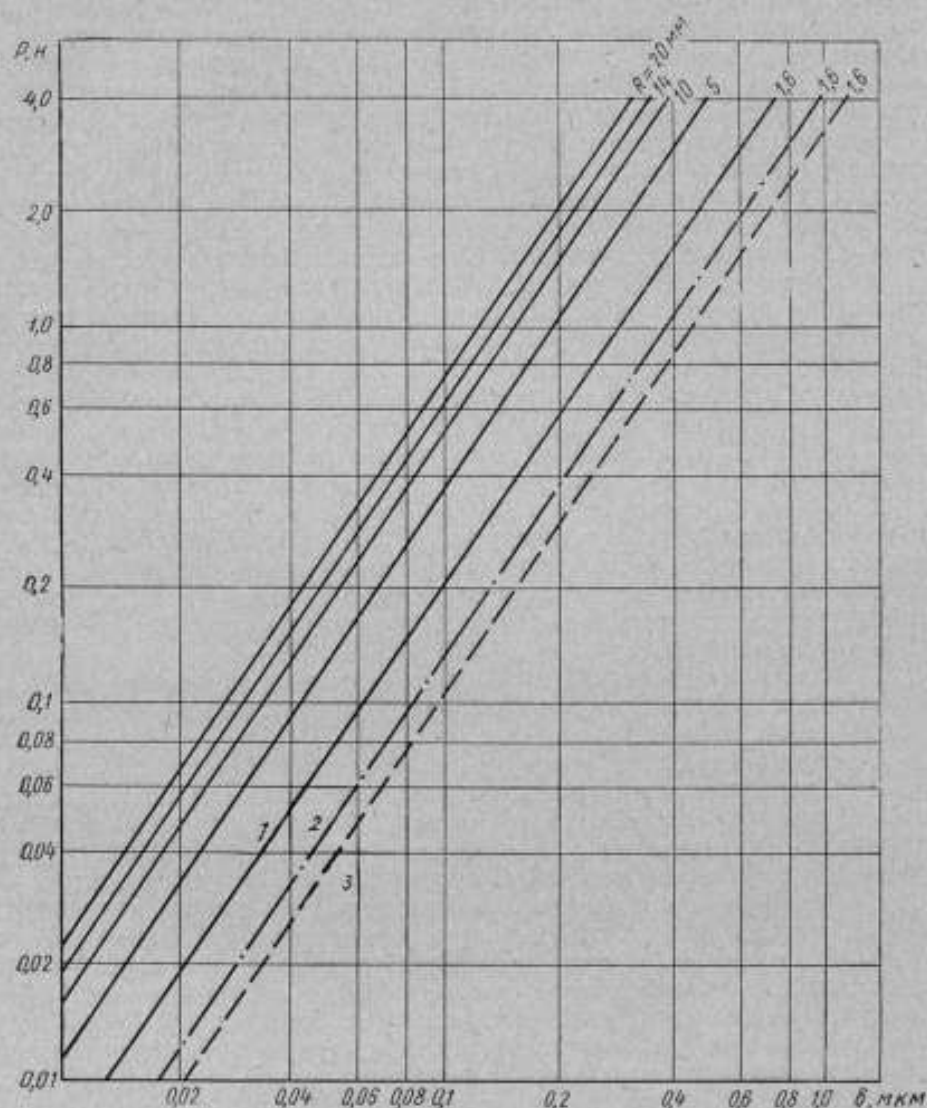


Рис. 2. Номограмма для определения контактной деформации при стальных измерительных наконечниках (модуль упругости $E_1 = 2,2 \cdot 10^5$ н/мм², коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$).

1 — стальные детали ($E = 2,2 \cdot 10^5$ н/мм², $\mu = 0,3$); 2 — детали из бронзы и латуни ($E = 10^5$ н/мм², $\mu = 0,35$); 3 — детали из алюминиевого сплава ($E = 0,72 \cdot 10^5$ н/мм², $\mu = 0,3$).

тельного усилия для различных материалов и измерительных наконечников можно легко определить по номограмме (рис. 2), построенной в логарифмических координатах по расчетным данным.

Точность поправки зависит от точности определения контактной деформации и от точного знания измерительного усилия в момент изме-

рения. Например, зная измерительное усилие с погрешностью до $0,01\text{ м}$ и применяя измерительные наконечники с радиусом сферы $1,6\text{ мм}$, можно вносить поправку с погрешностью до $0,02\text{ мкм}$ в результат измерения для деталей из алюминиевых сплавов, до $0,018\text{ мкм}$ — для латунных и бронзовых, до $0,013\text{ мкм}$ — для стальных.

На практике действительное значение измерительного усилия в момент измерения неизвестно, и его определение представляет трудности. Существующие методы и средства для поверки приборов не обеспечивают получение достаточно полной картины изменения измерительного усилия в пределах шкалы, необходимой для учета контактных деформаций.

Измерительное усилие обычно определяют в начальной и конечной точках шкалы прибора [4], но характер его изменения в пределах шкалы остается неизвестным. В работе [1] показано, что, кроме изменения измерительного усилия пропорционально перемещению измерительного наконечника, имеются как местные колебания этого усилия на различных участках шкалы, так и колебание его при изменении направления движения измерительного наконечника. Например, местные колебания измерительного усилия оптиматоров с ценой деления шкалы $0,1\text{ мкм}$ оказались порядка $0,02-0,09\text{ н}$. Этим колебаниям для стальных деталей и наконечников с размером сферы $1,6\text{ мм}$ будут соответствовать контактные деформации порядка $0,03\text{ мкм}$. Для приборов с ценой деления менее $0,1\text{ мкм}$ такие местные колебания измерительного усилия особенно опасны, так как они будут соизмеримы с ценой деления.

Для всех контактных приборов измерительное усилие определяют с помощью циферблатных весов типа ВНЦ-2 (ГОСТ 7327-55) с ценой деления 2 г и пределом измерения по шкале 200 г , или типа ВНЦ-5 с ценой деления 5 г и пределом измерения по шкале 500 г , а также с помощью приспособления, входящего в комплект контактного интерферометра (ГОСТ 8290-57) с набором гирь Г-1-1110 (ГОСТ 7328-65).

При поверке приборов с малым измерительным усилием до 200 г используют весы ВНЦ-2, а для приборов с измерительным усилием более 200 г — весы ВНЦ-5.

Указанными средствами невозможно получить с достаточной точностью полную характеристику изменения измерительного усилия в пределах шкалы для всех встречающихся на практике измерительных приборов в условиях их применения, т. е. в статике и динамике, так как эти средства предназначены только для измерений в статике и не универсальны.

На основании всего сказанного выше можно заключить, что контактные деформации могут быть достаточно большими и существенно снижать точность измерений. С этим необходимо считаться при высокоточных измерениях приборами с ценой деления менее $0,1\text{ мкм}$ и принимать меры для уменьшения или учета погрешностей от деформации. Кроме того, действующие в настоящее время методы и средства поверки измерительного усилия не обеспечивают получения достаточно полной характеристики колебания измерительного усилия во всем диапазоне шкалы и требуют уточнения в связи с разработкой новых высокоточных приборов с ценой деления менее $0,1\text{ мкм}$ и малым измерительным усилием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Н. Н., Сацердотов П. А. Влияние измерительного усилия приборов на погрешность измерений. «Измерительная техника», 1965, № 4.
2. Беридт Г. Основы и приборы технических измерений. М.—Л., ОНТИ, 1935.
3. Уверский И. Т. Интерференционные контактные методы измерения длин для машиностроения. Автореферат диссертации, М.—Л., Станкоинструментальный институт, 1954.
4. Инструкция 79-65 по поверке оптиматоров. М., Издательство стандартов, 1965. Поступила в редакцию 3/III 1967 г.

О ПОВЕРКЕ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

Контроль размеров деталей в процессе их обработки на металлорежущих станках происходит обычно при непрерывном изменении значения измеряемой величины, т. е. в динамическом режиме, что вызывается изменением расположения детали относительно чувствительного элемента прибора, а также самой обработкой. В динамическом режиме работают и контрольные автоматы, устройства для контроля бвенения и правильности формы поверхностей, устройства для контроля размеров проката и др. В этом режиме проверяют, например, состояние рельсовых путей с помощью путеизмерителя ЦНИИ-2 (Госреестр № 2140—65) при рабочей скорости его 70—110 км/ч.

Следует отметить, что государственные стандарты и инструкции предусматривают поверку указанных приборов и устройств в статическом режиме, фактически же они работают в динамическом, в котором погрешности могут значительно возрастать.

Таким образом, приборы, признанные годными при поверке в статическом режиме, могут оказаться неудовлетворительными в динамическом. В связи с этим к точным приборам, работающим как в статическом, так и в динамическом режиме, необходимо предъявлять более жесткие требования, чем к подобным приборам, используемым только в статическом режиме.

Систематическую погрешность прибора принципиально возможно компенсировать введением поправок, практически же она исключается лишь частично. Одной из основных причин этого является непостоянство характера изменения значения измеряемой величины. В данном случае систематическая погрешность прибора может частично перейти в случайную погрешность измерения.

Пусть при контроле в процессе обработки такие параметры, как амплитуда A и частота f колебаний, а также скорость v изменения размера детали, изменяются для партии деталей по случайному закону в пределах A_1 — A_2 , f_1 — f_2 и v_1 — v_2 . Если представить эти параметры в виде $A_0 \pm \Delta A$, $f_0 \pm \Delta f$, $v_0 \pm \Delta v$, где $A_0 = \frac{A_1 + A_2}{2}$, $\Delta A = \frac{A_2 - A_1}{2}$ и т. д., то погрешности, свойственные A_0 , f_0 и v_0 , будут систематическими погрешностями прибора в динамическом режиме, и, следовательно, их можно учесть и компенсировать при настройке прибора. Погрешности, вызванные колебаниями $\pm \Delta A$, $\pm \Delta f$ и $\pm \Delta v$, как неслучайные функции случайных аргументов, являются случайными погрешностями измерения, и их компенсировать нельзя. Так, при колебаниях только скорости (рис. 1), по-

лагая, что Δv мало по сравнению с v_0 и что на участке v_1-v_2 функция $\delta = \delta(v)$ — линейна (δ — предельные значения суммарной погрешности в динамическом режиме), можно записать

$$\delta = \delta(v_0 \pm \Delta v) \approx \delta(v_0) \pm \delta'(v_0) \Delta v,$$

где $\delta(v_0)$ и $\delta'(v_0)$ — соответственно систематическая погрешность прибора и ее производная при постоянной скорости v_0 ; $\pm \delta'(v_0) \cdot \Delta v$ — предельные значения случайной погрешности измерения из-за непостоянства скорости изменения размера.

Если при измерении, кроме v , изменяются A и f , то для функции $\delta = \delta(A, f, v)$ получим

$$\begin{aligned} \delta &= \delta(A_0 \pm \Delta A, f_0 \pm \Delta f, v_0 \pm \Delta v) = \\ &= \delta(A_0, f_0, v_0) \pm \delta'_A(A_0, f_0, v_0) \Delta A \pm \\ &\pm \delta'_f(A_0, f_0, v_0) \Delta f \pm \delta'_v(A_0, f_0, v_0) \Delta v, \end{aligned}$$

где $\delta(A_0, f_0, v_0)$ — систематическая погрешность прибора при постоянных параметрах динамического режима.

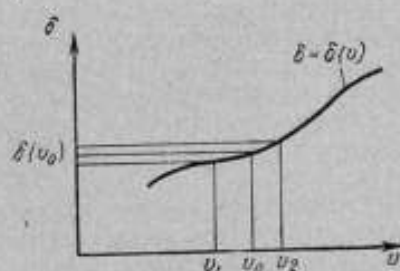
Из этого выражения можно заключить, что для уменьшения погрешности измерения, а следовательно, и изготовления деталей при активном контроле целесообразно:

а) уменьшить систематические погрешности прибора в динамическом режиме или хотя бы сделать их более постоянными на рабочих участках режимов изменения размера (одной лишь поднастройкой обойтись в большинстве случаев нельзя);

б) определить закон изменения погрешности прибора во всем диапазоне рабочих режимов изменения размера.

Кроме систематических в динамическом режиме могут изменяться и дисперсии случайных погрешностей, что невозможно компенсировать настройкой прибора.

Рис. 1. Схема возникновения случайных погрешностей измерения.



сперсии случайных погрешностей, что невозможно компенсировать настройкой прибора.

Точность измерительного прибора принято оценивать главным образом по его основной погрешности, которую находят при нормальных условиях. Под этой погрешностью понимают разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины. Чтобы свести к минимуму изменение показаний прибора, целесообразно создать такие условия, при которых достаточно мало влияние внешних вибраций и колебаний параметров сети питания прибора, а температура окружающего воздуха близка к нормальной.

При оценке точности приборов автоматического контроля необходимо соблюдать те же принципы. Однако в этом случае, как уже говорилось, следует учитывать изменение значения измеряемой величины в динамическом режиме.

Понятие основной погрешности прибора в динамическом режиме, зависящей не только от конструкции прибора и значения измеряемой величины, но и от характера изменения этого значения, можно считать наиболее общим. Эту погрешность можно представить в виде зависимости от динамических параметров измеряемой величины, например: $\delta = \delta(v)$ или $\delta = \delta(A, f)$. Погрешность δ , в частности, сводится к погрешности в статическом режиме, если интенсивность изменения размера мала (квазистатический режим) или равна нулю.

Другие метрологические характеристики приборов в статическом режиме сохраняются и для приборов в динамическом режиме, однако некоторые из них (например, вариация показаний, измерительное усилие) приобретают более широкий («динамический») смысл. Определение этих характеристик необходимо при поверке.

Остановимся подробнее на определении основной погрешности в динамическом режиме, так как в настоящее время имеются серьезные расхождения в ее оценке. Хотя большинство исследователей считают эту погрешность наиболее важной характеристикой прибора в динамических условиях, однако в ее формулировке нет единой точки зрения [1—14]. Все исследователи сходятся в том, что для определения этой погрешности следует найти некоторую разность $\delta = Y - X$, но при этом одни [4, 5] вычитают из показаний в статическом режиме показания в динамическом режиме, другие же — наоборот [9, 11, 13]. Знаки погрешностей в работах [6, 7] по сравнению с [8] также расходятся. Если не учитывать знаки, то и в отношении величин Y и X мнения не совпадают. Под Y понимают показание поверяемого прибора в динамическом либо в переходном режиме. Что касается X , то здесь расхождения еще более значительны. Можно выделить три различных подхода, при которых за X принимают:

- 1) показания $X_{ПС}$ поверяемого прибора в статическом режиме [5, 9, 13] или при отсутствии динамических воздействий [1, 2];
- 2) показания $X_{ОС}$ в статическом режиме другого, как правило, более точного прибора [12];
- 3) значение выходной величины идеальной (расчетной, без погрешностей) системы [6], истинное или действительное значение измеряемой величины [3, 7, 8] $X_{ОД}$ в тот же момент времени, при котором снимали показание Y .

Приняв за Y_D показание в более общем случае (в динамическом режиме), сведем эти три подхода к трем различным схемам поверки, показанным на рис. 2. Эти схемы можно реализовать с помощью экспериментальной установки, обобщенная схема которой представлена на рис. 3. На столе 3 устройства, моделирующего динамический режим (например, гармонические колебания), расположены поверяемый 1 и образцовый 2 приборы. Последний не применяют в первой схеме (пунктирная линия, рис. 2),

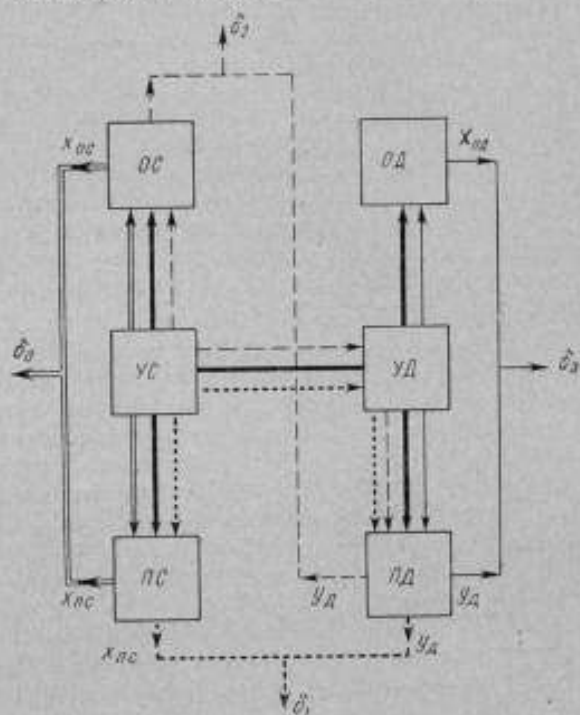


Рис. 2. Общая функциональная структурная схема определения погрешностей приборов.

ОС, ПС и УС — образцовый, поверяемый приборы и моделирующая установка в статическом режиме; ОД, ПД и УД — то же в динамическом режиме.

во второй (штриховая линия) используют лишь в статическом режиме, а в третьей схеме (сплошная тонкая линия) оба прибора используют в динамическом режиме. Проанализируем погрешности этих схем.

1. При поверке по первой схеме погрешность поверяемого прибора определяют как дополнительную из выражения

$$\delta_1 = Y_d - X_{пс}.$$

Погрешность поверки равна

$$\Delta\delta_1 = \pm \sqrt{(\delta X_{пс})^2 + \delta_{1ср}^2} + \Delta_{1ср},$$

где $\delta X_{пс}$ — случайная погрешность поверяемого прибора в статическом режиме;

$\delta_{1ср}$ и $\Delta_{1ср}$ — случайная и систематическая погрешности способа сравнения показаний прибора.

Так как при сличении в нормальных условиях значения $\delta_{1ср}$ и $\Delta_{1ср}$ сводятся в основном к погрешностям установки, которая должна обеспечивать измерение поверяемым прибором одного и того же размера в статическом и динамическом режимах, то

$$\Delta\delta_1 \approx \pm \sqrt{(\delta X_{пс})^2 + \delta_{1уc}^2 + \delta_{1уд}^2} + \Delta_{1уд},$$

где $\delta_{1уc}$, $\delta_{1уд}$ и $\Delta_{1уд}$ — случайные и систематическая погрешности установки соответственно в статическом и динамическом режимах.

2. При поверке по второй схеме погрешность прибора находят по формуле

$$\delta_2 = Y_d - X_{ос}.$$

Погрешность поверки в этом случае равна

$$\Delta\delta_2 = \pm \sqrt{(\delta X_{ос})^2 + \delta_{2ср}^2} + \Delta_{2ср} \approx$$

$$\approx \pm \sqrt{(\delta X_{ос})^2 + \delta_{2уc}^2 + \delta_{2уд}^2} + \Delta_{2уд},$$

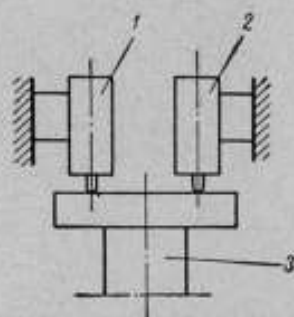


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

где $\delta X_{ос}$ — погрешность образцового прибора в статическом режиме, остальные обозначения аналогичны обозначениям в предыдущих формулах.

3. Погрешность поверяемого прибора по третьей схеме определяют из выражения

$$\delta_3 = Y_d - X_{од}.$$

Так как истинное значение измеряемой величины практически получить невозможно и систем без погрешностей не бывает, то $X_{од}$ будет соответствовать действительному значению измеряемой величины. Погрешность поверки

$$\Delta\delta_3 = \pm \sqrt{(\delta X_{од})^2 + \delta_{3ср}^2} + \Delta_{3ср}.$$

Считая, что при поверке в нормальных условиях непосредственным сличением образцовый и поверяемый приборы измеряют один и тот же размер, получим $\Delta\delta_3 \approx \delta X_{од}$.

Принятая схема поверки непосредственным сличением в статическом режиме изображена на рис. 2 двойными тонкими линиями. Погрешность

поверяемого прибора находят при этом согласно известному определению по формуле

$$\delta_0 = X_{\text{ПС}} - X_{\text{ОС}}$$

Сравнивая между собой погрешности поверки по первым трем схемам и принимая $\delta_{1УС} = \delta_{2УС}$; $\delta_{1УД} = \delta_{2УД}$; $\Delta_{1УД} = \Delta_{2УД}$, можно сделать вывод, что наибольшую погрешность поверки имеет первая схема, так как $\delta X_{\text{ПС}}$ всегда больше $\delta X_{\text{ОС}}$, а наименьшую — третья схема (при измерении одного и того же размера ее погрешность сводится в основном к погрешности образцового прибора). Следовательно, третья схема наиболее выгодная. Важным ее преимуществом является и возможность распространения на область динамики «статического» определения погрешности прибора как алгебраической разности между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины, но в один и тот же момент времени. В дополнение к сказанному следует отметить, что из-за необоснованного пренебрежения динамическими погрешностями установок, спроектированных в соответствии с первой или второй схемами, опубликованные экспериментальные данные представляются некоторым авторам (например [15]) недостаточно достоверными. Стремление уменьшить погрешности поверки на этих установках вызывает в свою очередь необходимость уменьшения их собственных погрешностей. При этом испытание рабочего прибора нередко превращалось в научное исследование, выполняемое высококвалифицированными работниками по специально разработанной широкой программе. Экономичнее и проще поверять такие приборы, сравнивая их показания с показаниями образцовых приборов, поверенных и аттестованных как в статическом, так и в динамическом режимах на поверочной установке, исследованной и аттестованной в метрологическом учреждении. Специально созданные для этого образцовые приборы должны иметь высокую точность как в статическом, так и в динамическом режимах и передавать значение единицы длины различным рабочим приборам. На рис. 4 приведена поверочная схема для перечисленных выше приборов, предлагаемая в дополнение к известной поверочной схеме для мер длины и приборов для линейных измерений [16].

С точки зрения методики поверки приборы, работающие в динамических условиях, целесообразно разделить на две группы: 1) показывающие или регистрирующие текущее значение измеряемой величины и 2) показывающие или сигнализирующие момент достижения установленного значения измеряемой величины (компарирующие). К показывающим текущий размер относятся многие приборы с визуальным отсчетом, в том числе и показывающие для активного контроля, к регистрирующим — измерители отклонений формы поверхностей, электрические самописцы для линейных измерений, профилографы, вибрографы. Компарирующие приборы используют для сравнения измеряемой величины с установочной мерой. Среди них различают амплитудные и предельные приборы. Первые (например, амплитудные датчики по ГОСТ 3899—58) реагируют лишь на колебание (переменную составляющую) размера и фиксируют превышение размахом этого колебания установленных пределов. Предельные компараторы реагируют на переменную и постоянную составляющие измеряемой величины; к ним относятся предельные электроконтактные датчики по ГОСТ 3899—58, пневмоэлектроконтактные датчики по нормали МН 60—61 и др.

Следует отметить, что и многие показывающие приборы, используемые для контроля деталей в процессе их обработки, практически работают как компараторы. Рабочий при этом следит за положением стрелки прибора относительно указателя поля допуска, предварительно настроенного

по установочной мере, и по достижении стрелкой указателя отключает вручную станок. Ввиду различия упомянутых групп приборов будут отличаться и методики их поверки. Рассмотрим эти методики.

Реальный закон изменения измеряемой величины может иметь довольно сложный характер. Поэтому при определении погрешностей измеритель-

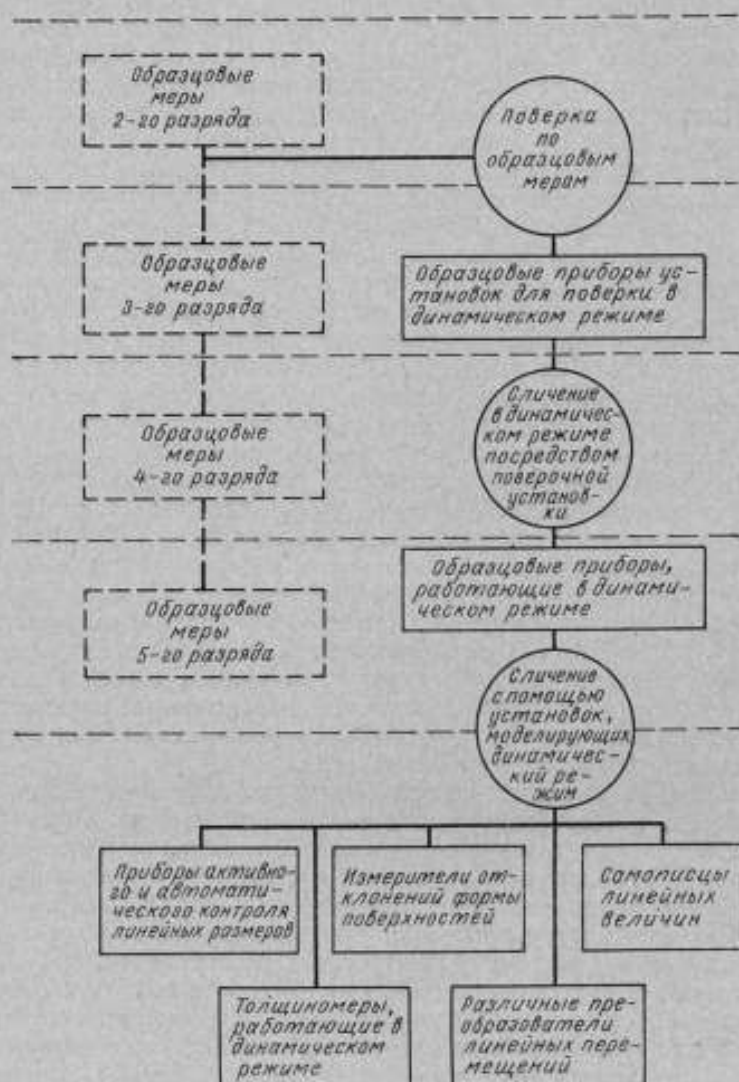


Рис. 4. Предлагаемая поверочная схема для приборов, работающих в статическом и динамическом режимах.

ного прибора в динамическом режиме следовало бы этот закон моделировать. Однако полностью осуществить эту задачу весьма трудно; на практике обычно ограничиваются типовыми законами изменения размера — гармоническим или линейным [4, 13—15]. Эти законы легко воспроизводимы, что облегчает моделирование динамического режима работы прибора.

Для приборов, показывающих текущее, непрерывно изменяющееся в процессе опыта значение, каждому моменту времени t_1 соответствует

своя погрешность (рис. 5):

$$\delta(t_i) = \alpha(t_i) - \beta(t_i)$$

или

$$\delta(t) = M\delta(t) + \varepsilon(t),$$

где $M\delta(t)$ и $\varepsilon(t)$ — систематическая и случайная погрешности (математическое ожидание функции и центрированная случайная функция).

Сложность определения погрешности в этом случае очевидна. Ввиду того, что данные приборы сравнительно редко применяют при автоматическом контроле, методику их поверки рассматривать в настоящей статье не будем.

Наиболее часто в системах автоматического контроля используют компарирующие приборы, погрешность которых достаточно определять лишь в момент достижения настроенного размера (момент срабатывания). При гармоническом законе изменения размера этот момент обычно соответствует моменту достижения экстремального показания прибора. Проведя сечение семейства реализаций случайной функции, получают систему случайных величин с постоянной дисперсией. Наибольший интерес при этом будут пред-

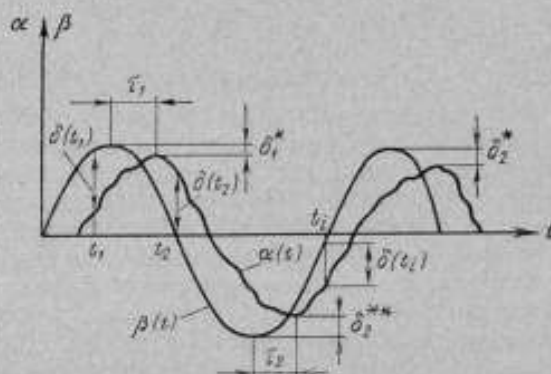


Рис. 5. График к определению погрешностей приборов в динамическом режиме:

$\alpha(t)$ — показание поверяемого прибора; $\beta(t)$ — действительное значение измеряемой величины.

ставлять алгебраические разности между соответствующими максимальными ($\delta_1^*, \delta_2^*, \dots, \delta_n^*$) или минимальными ($\delta_1^{**}, \delta_2^{**}, \dots, \delta_n^{**}$) показаниями прибора и действительными значениями измеряемой величины. У предельных приборов активного контроля целесообразно определять и время запаздывания τ , которое приводит к задержке отключения подачи станка и, следовательно, к погрешностям изготовления деталей.

Методика поверки компарирующих приборов может быть более простой, чем приборов, измеряющих текущее значение измеряемой величины. Предлагаем следующий ее вариант.

Поверяемый прибор настраиваем на заданный размер α_n , которому будет соответствовать показание образцового прибора β . Установив необходимый динамический режим, отсчитываем показание образцового прибора β' в момент совпадения с первоначальной настройкой α_0 поверяемого прибора. Полученная разность отсчетов $\delta = \beta' - \beta$ будет выражать погрешность поверяемого прибора в динамическом режиме. Многократно повторяя этот цикл, получаем показания образцового прибора: $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ и $\beta'_1, \beta'_2, \dots, \beta'_n$.

Уровень настройки поверяемого прибора будет совпадать со средним значением

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i}{n}$$

Систематическая погрешность прибора в динамическом режиме

$$\delta_{\text{сист}} = \bar{\beta}' - \bar{\beta},$$

а случайная

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i - \bar{\beta})^2}{n-1}}.$$

Погрешность поверки определяем по формуле

$$\Delta\delta \approx \sqrt{S_{\bar{\beta}}^2 + S_{\bar{\beta}'}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\beta_i - \bar{\beta})^2 + \sum_{i=1}^n (\beta_i' - \bar{\beta}')^2}{n(n-1)}},$$

где $S_{\bar{\beta}}$ и $S_{\bar{\beta}'}$ — погрешности средних значений.

Погрешность установки не входит в погрешность методики поверки.

В связи с тем, что существующие методы поверки не предусматривают определения указанных выше характеристик приборов, перед метрологическими и другими организациями стоит важная задача: для сохранения единства измерений в стране разработать методы и средства поверки приборов в динамическом режиме. Создание образцовых измерительных приборов и поверочных установок позволит в широких пределах моделировать условия работы различных устройств контроля и определять их погрешности с необходимой точностью.

Анализ показал, что производственные условия для многих приборов можно моделировать в первом приближении изменением размера по гармоническому закону в диапазонах частот 0,2—50 гц и амплитуд 0—50 мкм, а также по линейному закону — в диапазоне скоростей 0,001—0,03 мм/сек. В зависимости от точности поверяемых приборов погрешности образцовых измерительных приборов могут лежать в пределах 0,1—2 мкм.

Таким образом, создание методов и средств поверки, правильный выбор критериев точности в динамическом режиме позволят значительно улучшить качество и унифицировать конструкции выпускаемых приборов и систем контроля, а также обеспечит возможность потребителям выбирать приборы с учетом условий их эксплуатации и повысит качество контролируемых деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихменев С. С. Элементы точных приборов, М., Оборонгиз, 1956.
2. Юркевич А. П. и Вовченко Н. Я. Расчет электрических измерительных устройств и систем с силовой компенсацией. М., Оборонгиз, 1961.
3. Богданов Ю. М. Приборы точной механики. М., Машгиз, 1960.
4. Погорелый В. С. Исследование динамической точности устройств автоматического контроля размеров деталей в процессе шлифования. Сб. «Семинар по точности в машиностроении и приборостроении», вып. 18. М., изд. «Наука», 1964.
5. Цейтлин Я. М., Львович И. В., Юсов О. И. Фотоэлектрические датчики для автоматизации контроля. Л., ЛДНТП, 1963.
6. Быховский М. Л. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М., Изд. АН СССР, 1958.
7. Иорш Ю. И. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
8. Гевондян Т. А. и Киселев Л. Т. Приборы для измерения и регистрации колебаний. М., Машгиз, 1962.
9. Тищенко О. Ф., Калитенко В. Г. Методы поверки и наладки автоматических средств контроля размеров. М., Машгиз, 1967.
10. Методы поверки акселерометров, рекомендуемые к применению в испытательных лабораториях предприятий. М., Стандартгиз, 1964.

11. Добрынин Е. М. Приборы автоматического контроля размеров в машиностроении. М., Машгиз, 1960.
12. Добрынин Е. М. и Пан Чжун-чжэн. Вопросы динамической точности приборов автоматического контроля размеров. М., Машгиз, 1963.
13. Балакшин О. Б. Исследование динамической точности и производительности пневматических контрольно-измерительных устройств. Сб. «Вопросы точности и надежности в машиностроении», М., Изд. АН СССР, 1962.
14. Балакшин О. Б. Автоматизация пневматического контроля размеров в машиностроении. М., Машгиз, 1964.
15. Ковтуненко Е. Ю. Разработка методов и средств контроля динамической точности электроконтактных датчиков линейных измерений. Автореферат диссертации, МВТУ, 1965.
16. Поверочные схемы. М., Издательство стандартов, 1965.

Поступила в редакцию 15/VI 1967 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ
ПРОЕКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С ВИБРИРУЮЩИМ ЭКРАНОМ

Разрешающая способность — одно из наиболее важных свойств оптической системы, которое в значительной степени определяет точность измерения.

Качество спроецированного на экран изображения зависит от рассеивающих элементов (числа, размера, формы и размещения зерен) на его поверхности. Разрешающая способность системы снижается вследствие искажений изображения, обусловленных зернистой структурой матовой поверхности экрана.

В последнее время в литературе появились сведения о применении движущихся матовых экранов для повышения разрешающей способности оптических систем. Так, например, Э. Лау [1, 2] использовал вращающийся матовый стеклянный диск для получения больших увеличений с помощью микроскопа. В обычных микроскопах при таких увеличениях выходящие пучки лучей имеют малое поперечное сечение и поэтому проходят через небольшие участки поверхностей линз окуляра и глазной линзы. Вследствие неоднородности этих поверхностей происходят искажения изображения.

Э. Лау поместил в плоскость изображения микроскопа вращающийся стеклянный матовый диск и рассматривал изображение на нем с помощью второго микроскопа. Такой диск создавал рассеивающую среду, которая увеличивала действующую апертуру для вторичного изображения. Световые пучки проходили через большие участки поверхностей линз окуляра и глазной линзы, и все искажения, обусловленные неоднородностями этих поверхностей при больших увеличениях, не имели решающего значения. Изображение, создаваемое первым микроскопом, увеличивалось вторым микроскопом, и таким образом получали большие увеличения при хорошем качестве изображения.

Д. Мак-Лачлан и Д. Адамс [3] для повышения качества изображения использовали движение матового экрана. Они перемещали экран в плоскости изображения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. В работе [3] приведены фотоснимки изображений миры, на которых видны явные преимущества применения движущегося экрана.

Во ВНИИМ была изучена возможность улучшения качества изображения, проецируемого на экран при его вибрации. Рассмотрим принцип действия экрана.

Пусть световой луч AP (рис. 1) падает на матовую стеклянную поверхность в точке P и преломляется в направлении PB . Если перемещать

матовое стекло в направлении DC , то возникает конус лучей, в котором световой луч все время перемещается, но исходит всегда из одной и той же точки изображения. При соответствующей скорости перемещения экрана быстрое изменение направления этого луча не будет восприниматься глазом. В данном случае отдельные элементы изображения действуют как самосветящиеся точки. При этом апертура светового пучка увеличивается и искажения, обусловленные зернистостью матового экрана, устраняются.

Была исследована разрешающая способность оптической системы с различными стеклянными экранами, вибрирующими в плоскости изображения, а именно:

1) матовыми типов М-7, М-10, М-20, М-28, изготовленными механическим способом — шлифовкой последовательно убывающими по крупности шлифпорошками;

2) матовыми типов N 320 + HF (10 мин), N320 + HF (5 мин), М-28 + HF (7 мин), изготовленными комбинированным способом — механическим матированием электрокорундом и травлением в разбавленной плавиковой кислоте в течение 10, 5, 7 мин соответственно;

3) восковыми с толщиной слоя воска 0,3 мм.

Фотометрические свойства этих экранов описаны в работе [4] Г. М. Городинского и Л. А. Михайловской.

Оптическая схема экспериментальной установки ВНИИМ, на которой проводили исследование, представлена на рис. 2.

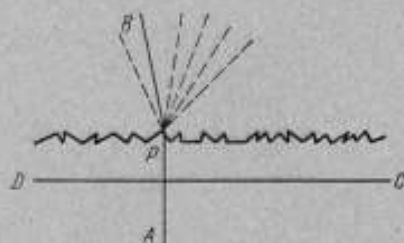


Рис. 1. Схематический ход светового луча при движении матового экрана.

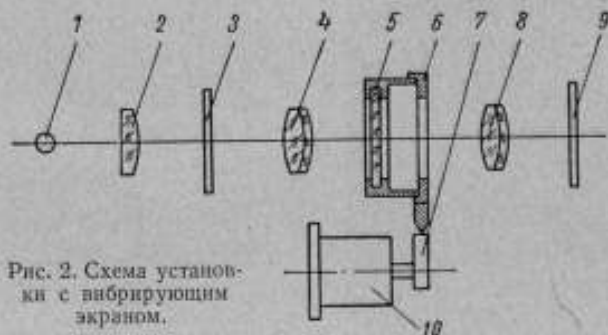


Рис. 2. Схема установки с вибрирующим экраном.

Источником света служила лампа накаливания 1. Свет от нее через конденсор 2 попадал на мишень 3*. Изображение этой мишени объектив 4 проецировал на матовый экран 5 с некоторым уменьшением, так что частота штрихов поля изображения на экране лежала в пределах 22—90 лин/мм. Качество изображения оценивали фотографическим способом. Для этого вторичное изображение мишени 3 проецировалось в плоскость фотопленки 9 вторым объективом 8 с увеличением около $5\times$ с тем, чтобы исключить возможное влияние зернистости фотопленки.

Для вибрации экрана его укрепляли в рамке с двойным пружинным подвесом 6. При этом возвратно-поступательное движение каждой его точки происходило строго параллельно плоскости изображения (для исклю-

* В работе была использована стандартная мишень № 4 (нормаль ГО 1671—56).

чения расфокусировки) в горизонтальном направлении с частотой 2,2 гц и с амплитудой 2 мм. Это движение передавалось рамке от электродвигателя РД-09 с редуктором 10 через кулачковый механизм 7. Амплитуда вибрации экрана значительно превышала среднюю величину рассеивающих впадин, размер которых даже для очень грубо обработанного экрана составлял 40—50 мкм.

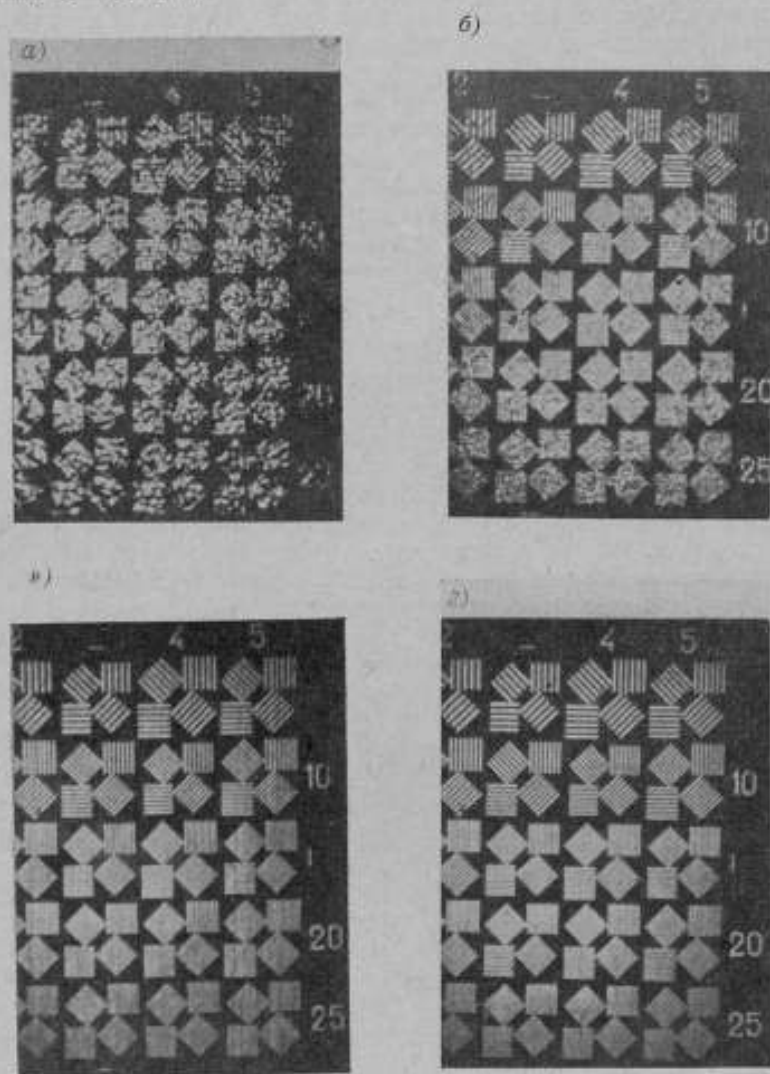


Рис. 3. Изображение миры на неподвижном (а, б) и вибрирующем (в, г) экранах.

Исследуемые экраны укрепляли последовательно в рамке пружинного подвеса. Изображение миры 3 фокусировалось перемещением проецирующего микрообъектива 4 на экран и затем вторичное изображение перемещением микрообъектива 8 — в плоскость фотопленки 9. Фокусировку контролировали визуально с помощью десятикратной лупы. Вторичное изображение при неподвижном и вибрирующем экране регистрировали на фотопленке типа МЗ-2.

Для примера на рис. 3 приведены изображения миры на неподвижном (а и б) и на вибрирующем (в и г) экранах. На фотоснимках хорошо заметны изменения качества изображения при вибрации экрана. Данные об изме-

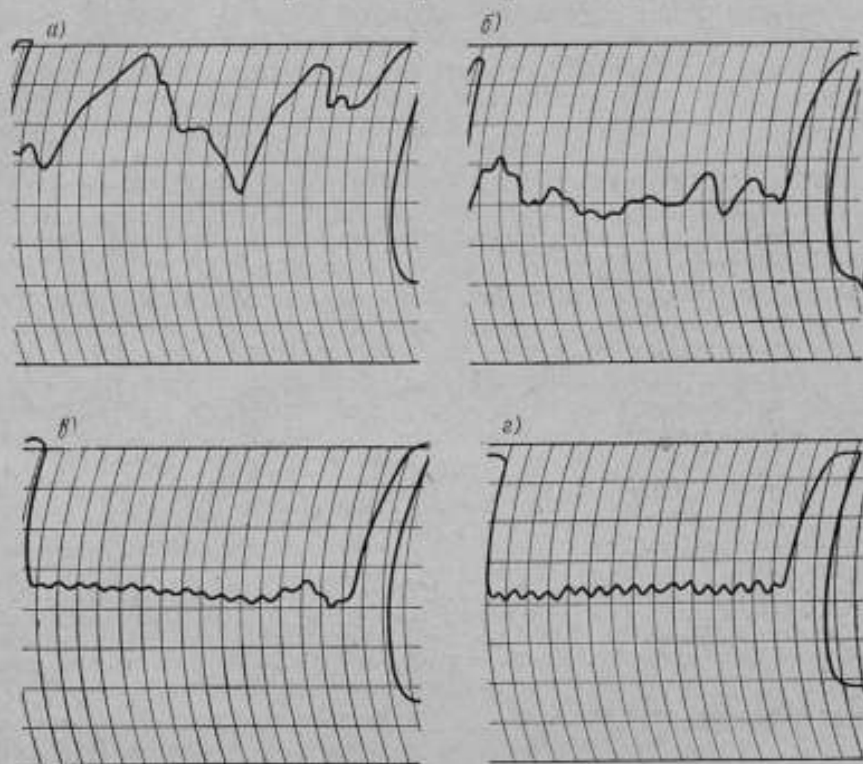


Рис. 4. Микрофотограммы плотностей почернения штрихов группы элементов № 25 миры на неподвижном (а, б) и вибрирующем (в, г) экранах.

рени разрешающей способности систем с различными типами стеклянных экранов при их вибрации приведены в таблице.

Тип экрана	Разрешающая способность системы (л/мм) при экранах	
	неподвижном	вибрирующем
N320+HF (10 мин)	30	90
N320+HF (5 мин)	50	90
M-28+HF (7 мин)	35	90
M-28	60	90
M-20	70	90
M-10	75	90
Восковой	35	35

Для количественной оценки качества изображения миры на экранах с негативов, полученных при эксперименте, были сняты микрофотограммы на микрофотометре типа МФ-4 с самопишущим прибором постоянного тока.

На рис. 4 приведены микрофотограммы записи плотностей почернения штрихов изображений миры, соответствующие рис. 3.

Из рис. 3 и 4 видно, что при вибрации экранов уничтожаются все искажения изображения миры, обусловленные зернистой структурой матовой поверхности экрана: штрихи приобретают правильную форму, пределы разрешения системы даже с грубым матовым экраном и экраном, обработанным микропорошком, становятся практически одинаковыми.

Следовательно, вибрирующие экраны могут быть использованы в различных оптических приборах, но для визуального наблюдения они должны вибрировать с частотой, незаметной для человеческого глаза, т. е. не менее 20—25 гц.

При исследовании воскового экрана было обнаружено, что он не вносит искажений в структуру изображения, однако из-за большого рассеяния в слое воска разрешающая способность такой оптической системы низка по сравнению с системами с матовыми экранами.

Проведенные исследования показали, что применение вибрации матовых экранов с амплитудой, превышающей величину рассеивающих элементов его шероховатой структуры, и частотой около 20 гц значительно улучшает качество проекционных измерительных приборов, в которых необходимо различать на экране изображение мелких деталей и производить измерительные операции.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Lau und R. Schalte. Realisierung von extremen lichtoptischen vergrößerungen und ihre Bedeutung. «Feingeräte technik», 1958, № 3.
2. E. Lau. Das lichtoptische Doppelmikroskop. «Optik», 1960, B-17, № 9—10.
3. D. McLachlan and D. Adams. Reduced Graininess of Moving Screens. «JOSA», 1965, v. 55, № 12.
4. Городинский Г. М., Михайловская Л. А. Рассеивающие свойства матовых стекол в проходящем свете. «Опико-механическая промышленность», 1959, № 10.

Поступила в редакцию 11/IV 1967 г.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ
В КАЧЕСТВЕ ИНДИКАТОРА УСТАНОВКИ ШТРИХА
ПРИ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ**

Известно, что процесс линейных и угловых измерений штриховых шкал и лимбов состоит из двух этапов: выведения штриха на оптическую ось микроскопа на основании наблюдения его изображения и измерения линейного или углового расстояния между различными штрихами. При наведении на штрих микроскоп выполняет роль индикатора, а источником информации об относительном положении штриха является его изображение.

Во ВНИИМ была исследована оптическая система с фазовой модуляцией, которая может быть использована в качестве индикатора установки штриха при линейных и угловых измерениях.

Эту систему можно применять для мер или лимбов с прозрачными штрихами на непрозрачном фоне, которые могут быть нанесены на стеклянные меры и лимбы, широко применяемые в настоящее время в метрологической практике. При исследовании в качестве такого штриха служила механическая щель, ширину которой возможно было изменять.

Исследование не ставило целью создание индикатора новой конструкции. В задачи его входили: оценка возможностей нового метода индикации, изучение явлений, связанных с применением фазовой модуляции, определение оптимальных параметров оптической системы.

Системы с фазовой модуляцией применялись уже в оптике, в частности для повышения разрешающей способности оптических систем [1]. Однако в настоящей работе задача состояла не в формировании изображения объекта, а в получении информации о его перемещении. Поэтому было использовано интерференционное анализирующее устройство, исключающее необходимость формирования изображения.

Принцип работы исследованной системы с фазовой модуляцией состоит в следующем. Если на узкую щель спроецировать интерференционную картину с некоторым градиентом разности хода (или фазы), то щель выделит из этой картины ограниченный интервал, которому соответствует определенное значение разности хода. Последующий анализ света, прошедшего через щель, дает возможность регистрировать смещение щели относительно неподвижной картины.

На рис. 1 изображена оптическая схема установки, на которой производили исследование с интерферометром Майкельсона, использованным для оценки точности индикации.

Излучение источника белого света 1 конденсор 2 направляет на интерференционный клин Фабри—Перо 3. Интерференционную картину, локализованную на клине 3, микрообъектив 4 проецирует на щель 5. Прошедший через щель 5 свет направляется линзой 6 на интерференционные клинья Фабри—Перо 7, в которых возникают интерференционные полосы переналожения. Последние служат источником информации об относительном смещении щели.

Для удобства индикации в анализирующем устройстве предусмотрены два противоположно направленных клина. Положение индикации, определяемое совпадением ахроматических полос переналожения на обоих клиньях, соответствует выделению зоны интерференционной картины, для которой толщина клина 3 будет равна толщине клиньев 7 на линии их пересечения.

На рис. 2 наглядно пояснено возникновение интерференционной картины на



Рис. 1. Оптическая схема установки для фиксации положения прозрачного штриха с интерферометром Майкельсона.

клиньях 7, а также показана зависимость величины перемещения ахроматических полос от соотношения углов клиньев 3 и 7.

Произведем предварительную оценку точности индикации. Увеличение системы, очевидно, будет равно

$$N = \frac{\Delta L}{\Delta l} = \frac{\alpha_1 \Gamma}{\alpha_2},$$

где ΔL — смещение ахроматических интерференционных полос на клиньях 7, обусловленное смещением щели на Δl ;

α_1 и α_2 — углы клиньев 3 и 7 соответственно;

Γ — оптическое уменьшение, с которым интерференционная картина, локализованная на клине 3, проецируется на щель 5.

Конечные размеры щели 5 накладывают ограничения на угол α_1 и оптическое уменьшение Γ проекционной системы. Эти параметры следует выбирать исходя из того, что расстояние между соседними максимумами интерференции в спроецированной на щель интерференционной картине не должно быть меньше ширины щели.

При ширине щели 5 мкм был выбран угол $\alpha_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ рад, а коэффициент уменьшения $20\times$. Это соответствовало расстоянию 100 мкм

между максимумами интерференции для длины волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ на клине 3 и расстоянию 5 мкм — на его изображении. Угол α_2 составлял $5 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$, что соответствовало расстоянию между максимумами интерференции 5 мкм. Таким образом, увеличение системы $N = 1000\times$.

Отсюда следует, что при совмещении ахроматических интерференционных полос на клиньях 7 с погрешностью $\pm 0,1 \text{ мкм}$ погрешность индикации положения штриха должна быть порядка $\pm 0,1 \text{ мкм}$.

Необходимо отметить, что исходя из условий получения многолучевой интерференции в клине [2] толщина клиньев должна быть по возможности меньше и для клиньев 3 и 7 в рабочей зоне составляла приблизительно 10 мкм.

При контроле положения штриха с помощью интерферометра Майкельсона средняя квадратическая погрешность индикации составляла $\pm 0,1 \text{ мкм}$, что соответствовало предварительному расчету. В предлагаемой схеме точность индикации может быть несколько увеличена, но, по всей вероятности, не более чем в 2—3 раза.

Описанную систему можно использовать также для измерения абсолютной величины перемещений в пределах нескольких микрометров. Для этого необходимо проградуировать один из интерференционных клиньев 7 в монохроматическом свете и при смещении штриха измерять сдвиг ахроматической полосы.

Существенным недостатком исследованной интерференционной системы является ее малое светопропускание, вызванное использованием серебряных отражающих покрытий с большим коэффициентом поглощения. Применение диэлектрических широкополосных отражающих покрытий позволит устранить этот недостаток.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карташев А. И. Оптические системы с повышенной разрешающей способностью // Оптика и спектроскопия, 1960, т. IX, вып. 3.
2. Розенберг Г. В. Оптика тонкослойных покрытий. М., Гостехиздат, 1958.

Поступила в редакцию: 1/VI 1967 г.

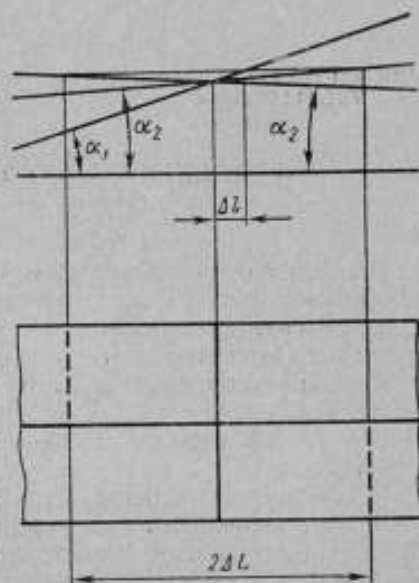


Рис. 2. Схема получения ахроматических полос переналожения на интерференционных клиньях 7.

УДК 621.396.967.27.089.6
531.719.24.089.6

О ПОВЕРКЕ РАДИО- И СВЕТОДАЛЬНОМЕРОВ

В настоящее время при выполнении геодезических, гидрографических, маркшейдерских и инженерно-геодезических работ все чаще применяют радио- и светодальномеры, позволяющие с высокой точностью измерять расстояния от метра до нескольких десятков километров.

Первый в мире радиодальномер МПЩ-1, пригодный для полевых измерений, был создан в СССР в начале 30-х годов. Светодальномер создан в 1936 г. коллективом сотрудников Государственного оптического института.

Погрешность измерений первыми дальномерами составляла 1 м и более. Точность современных электронных дальномеров согласно резолюции Международного симпозиума по применению электронной техники, состоявшегося в 1965 г. в Дрездене, оценивается по единой формуле

$$\epsilon_L = \pm (A + B \cdot 10^{-6}L), \quad (1)$$

где L — измеряемое расстояние;

A и B — постоянная и переменная части погрешности дальномера, см; величина B зависит от измеряемой длины.

В соответствии с этой формулой относительные погрешности измерений предельных расстояний для светодальномеров, например типов ЭОД-1 и ТД-1, лежат в пределах $1,7 \cdot 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-6}$, а для радиодальномеров типа «Теллуrometer» $< 4 \cdot 10^{-6}$.

В Национальной физической лаборатории Великобритании разработан светодальномер «Мекометр», погрешность которого при измерении расстояния 50 м составляет $5 \cdot 10^{-2}$ мм [1].

Измерение радио- и светодальномерами расстояния между двумя пунктами основано на определении времени прохождения его электромагнитным колебанием от момента излучения до момента приема в прямом и обратном направлениях. Измеряемое расстояние при этом определяют по формуле

$$L = \frac{c_0 \tau}{2n} + K,$$

где c_0 — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме;

τ — интервал времени;

n — средний коэффициент преломления воздуха по трассе в момент измерений;

K — постоянная поправка.

Измерение расстояний электронными методами сопровождается погрешностями:

1) принятого значения скорости света c_0 в вакууме . . . $0,3 \cdot 10^{-6}$ км/сек

- 2) измерения интервала времени τ распространения электромагнитных волн [2] $0,5 \cdot 10^{-9}$ сек
 3) определения постоянных поправок K дальномера $2 \cdot 10^{-3}$ м
 4) определения коэффициента n преломления воздуха $(0,7 \div 15) 10^{-8}$

Последняя погрешность зависит от методов и средств определения метеорологических параметров (влажности, температуры, давления, содержания CO_2 в атмосфере и др.) [3].

Постоянную поправку дальномера и погрешность кварцевого генератора частоты следует определять при поверке дальномерной аппаратуры, что является необходимым условием обеспечения единства измерений. Аттестации подлежат также и средства полевого контроля частоты.

Суммарную погрешность измерения расстояний электронными методами можно вычислить по формуле

$$\sigma_L = \pm \sqrt{\left(\frac{\tau}{2n}\right)^2 \sigma_{c_0}^2 + \left(\frac{c_0}{2n}\right)^2 \sigma_{\tau}^2 + \left(\frac{c_0 \tau}{2n^2}\right)^2 \sigma_n^2 + \sigma_K^2}$$

Приняв в качестве исходных $\tau = 6,6 \cdot 10^{-9}$ сек; $n = 1,0002574$; $c_0 = 299\,792,5$ км/сек и соответствующие погрешности $\sigma_{\tau} = 5 \cdot 10^{-10}$ сек, $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-9}$, $\sigma_{c_0} = 0,1$ км/сек, $\sigma_K = 2 \cdot 10^{-3}$ м, получим $\sigma_L = 75$ см. Погрешность среднего из многократных измерений можно принять равной 7,5 см, что значительно отличается от приведенных выше погрешностей радио- и светодальномеров.

Постоянные поправки электронной приемо-передающей дальномерной аппаратуры определяют, как правило, на линиях, длина которых уже была определена инвариантными 24-метровыми проволоками или высокоточными светодальномерами типа ЭОД-1. Кроме того, для этой цели используют стороны сетей триангуляции или полигонометрии высших классов, погрешность определения которых колеблется в интервале $(1 \div 30) \cdot 10^{-6}$ км. Фактическая же длина таких сторон не может быть измерена светодальномерами с достаточной степенью достоверности, так как постоянные поправки определяют либо на оптической приставке светодальномера ЭОД-1, либо с помощью оптической петли прибора NASM-4, которые, как правило, не аттестованы. Кроме того, при замене конденсатора Керра в светодальномере с демодуляцией светового потока может измениться значение постоянной поправки до $\pm 1 \cdot 10^{-2}$ м (без учета погрешностей центрирования отражателя и приемопередатчика). Естественно, что все перечисленные погрешности, а также погрешности компарирования проволок и вычислений длины контрольных базисов и сторон должны войти в результат определения постоянной поправки дальномера. Поэтому поправку, полученную с приведенной выше погрешностью ($2 \cdot 10^{-3}$ м), можно взять под сомнение.

Далее следует указать на отсутствие единых методов оценки точности измерений свето- и радиодальномерами. О точности измерений длины электронными методами обычно судят по сходимости результатов отдельных приемов в серии наблюдений. При этом систематические погрешности не учитывают, что приводит к искажению фактической точности дальномеров. Трудно также сравнивать точность различных электронных дальномеров. При контроле таких видов геодезических работ, как полигонометрия, не менее 20% измеренных электронными дальномерами сторон сетей измеряют повторно с помощью 24-метровых проволок. Между тем длина этих проволок уже была положена в основу контрольного базиса, на котором поверяли радио-или светодальномеры. Поэтому в данном случае точность оценивают также по результатам внутренней сходимости.

Как уже упоминалось выше, при измерении радио- и светодальномерами важное значение имеет коэффициент преломления воздуха n . Однако

в настоящее время еще нет единой методики определения этого коэффициента не только во время измерений, но и при определении постоянной поправки (если последнюю определяют в полевых условиях). Для электромагнитных волн радиодиапазона, например, рекомендуется вычислять значение n по формуле Эдлена

$$(n - 1) = \frac{1,3790}{(1 + \alpha t)} \cdot 10^{-6} p + \frac{16,58}{(1 + \alpha t)^2} \cdot 10^{-6} e, \quad (2)$$

где α — газовая постоянная;
 t — температура, °С;
 p — давление атмосферы;
 e — влажность.

Формула (2) была рекомендована в 1953 г. Международным консультативным комитетом по определению метра для немодулированного монохроматического источника света. Однако в 1964 г. в резолюциях Международной геодезической ассоциации по электронному и электрооптическому измерению расстояний отмечалось, что формула Эдлена не пригодна для измерений светодальномерами, так как до последнего времени в этих приборах применяли модулированные немонахроматические источники света. В целях упорядочения определения коэффициента преломления при измерениях светодальномерами было предложено вычислять групповой коэффициент

$$n_g = n_f - \lambda \frac{dn_f}{d\lambda};$$

здесь n_f — фазовый показатель преломления при стандартных условиях;
 λ — длина волны, мкм.

Для радиодиапазона рекомендована формула Эссена — Фрума

$$(n - 1) = \frac{103,49}{T} (p - e) + \frac{86,26}{T} \left(1 - \frac{57,48}{T}\right) e,$$

где T — температура, °К.

Коэффициент преломления воздуха определяют прямым или косвенным методом. Косвенный метод, основанный на учете метеорологических параметров (давления, температуры, влажности), получил наибольшее распространение. Погрешность определения n при этом складывается из погрешностей: измерения метеорологических параметров, постоянной психрометра и психрометрических таблиц. По данным И. Миттера, только погрешность определения влажности, равная ± 1 мм рт. ст. в интервале температур $0 < t < 20$ °С приводит к погрешностям измерения длины радиоволн $\pm 6,2 \cdot 10^{-6}$ и световых волн $\pm 5,3 \cdot 10^{-6}$ [3].

Указанные выше недостатки средств и методов определения коэффициента преломления воздуха, а также невозможность учета влияния отражения электромагнитных волн от земной поверхности приводят к погрешностям как линейных измерений, так и определения постоянной поправки дальномерной аппаратуры.

Определение величин A и B по формуле (1), а также создание единого метрологически обоснованного метода определения постоянных поправок должно обеспечить единство линейных измерений радио- и светодальномерами и повысить их точность хотя бы до уровня точности измерений 24-метровыми инварными проволоками.

Таким образом, для исследования и аттестации свето- и радиодальномеров всех классов точности необходимо:

1. Создание единой методики: а) определения постоянной поправки электронных дальномеров с погрешностью, не превышающей 1 мм, и тех-

нических норм поверки свето- и радиодальномеров, б) определения коэффициента преломления воздуха, обеспечивающей погрешность линейных измерений не более $1 \cdot 10^{-7}$.

2. Создание тысячеметрового базиса — компаратора с несколькими промежуточными точками. Компаратор должен быть оборудован приборами, контролирующими частоту, фазу, длину волны и другие параметры во время работы электронных дальномеров. При этом эталоны частоты должны обеспечивать компарирование частот модуляции с погрешностью не более $5 \cdot 10^{-9}$. Длину базиса следует определять интерференционным методом с погрешностью не более $1 \cdot 10^{-7}$; в качестве источника света может быть применен оптический квантовый генератор.

Уместно заметить, что государственными базисами длиной около 1 км располагают такие страны, как США, ФРГ, Финляндия, Норвегия, Япония, Португалия, Аргентина и др.

В настоящее время во ВНИИМ уже разработана установка для определения постоянной поправки с достаточной степенью точности.

В заключение следует заметить, что по сходимости результатов погрешность измерения длины электронными дальномерами достаточно высока. Поэтому, чтобы обеспечить единство линейных измерений в геодезии, гидрографии, маркшейдерии и расширить сферу применения радио- и светодальномеров для измерения длины в интервалах 1—1000 м, необходимо решить указанные выше задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bradsel R. H. Measuring distance with the Mecometer. «New Scientist», 1962, v. 15, № 297.
2. Draheim H. Tellurometer-Symposium «Allgemeine Vermessungs-Nachrichten», 1962, № 3.
3. Müller J. Zur Bestimmung des atmosphärische Dampfdruckes mittels Psychrometern. Über die Psychrometerformel und ihre Auswertung. «Allgemeine Vermessungs-Nachrichten», 1963, № 3.

Поступила в редакцию 25 /VII 1967 г.

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ

В течение последних лет в Харьковском государственном институте метрологии был создан двухлучевой радиоинтерферометр, работающий в миллиметровом диапазоне радиоволн и предназначенный для измерения больших длин.

Необходимость создания такой установки вызвана требованиями ряда областей современной науки и промышленности к существенному повышению точности измерения длин, достигающих десятков метров. Так, например, применяемые в геодезии мерные проволоки длиной до 24 м следует поверять с погрешностью не более $8 \cdot 10^{-7}$.

По ГОСТ 2689—54 допуски на валы и отверстия 1-го класса точности до 10 000 мм составляют величину порядка $1,3 \cdot 10^{-5}$, следовательно, поверку измерительных средств, применяемых для их контроля, следует производить с погрешностью не более $2 \cdot 10^{-6}$.

В настоящее время для этих целей применяют в основном концевые измерительные машины и интерференционные компараторы, в которых использован принцип оптического умножения.

Известно, что максимальная точность измерения длины может быть получена при непосредственном сравнении ее с длиной волны света. Однако предел измерения интерферометров ограничен малой когерентностью излучения имеющихся источников света*.

Успехи современной радиотехники сверхвысоких частот позволили применить для измерения больших длин интерференцию электромагнитных волн радиодиапазона, преимущества которых заключаются в том, что в этом диапазоне сравнительно просто получить излучение с узкой полосой частот (высокой когерентности). Кроме того, достаточно большая длина волны излучения позволяет легко определять порядок интерференции.

Радиоинтерферометр ХГНИИМ построен по двухлучевой схеме, аналогичной схеме интерферометра Майкельсона.

Электромагнитные волны, генерируемые источником *И* (рис. 1), поступают в делитель *2* (аналогом которого в интерферометре Майкельсона является полупрозрачное разделяющее зеркало). Часть энергии из делителя поступает по волноводу в рупорную антенну *5* и излучается в открытое пространство. Другая часть энергии поступает в закрытое плечо радиоинтерферометра и отражается интерференционным аттенуатором *3*. (В интерферометре Майкельсона для этой цели служит относительное зеркало.)

* В этой связи представляются перспективными созданные за последние годы источники нового типа — лазеры, имеющие большую когерентность излучения.

Энергия, излучаемая антенной, отражается зеркалом *б*, установленным на каретке, которая может перемещаться по направляющим вдоль оси рупорной антенны.

Электромагнитные волны, отраженные зеркалом и в закрытом плече, вновь поступают в делитель, где они и интерферируют.

Суперпозиция интерферирующих волн в делителе представляет собой электромагнитные колебания, амплитуда которых описывается соотношением

$$A = 2A_0 \cos \frac{4\pi l}{\lambda}, \quad (1)$$

где A_0 — амплитуда интерферирующих электромагнитных волн;

l — разность хода интерферирующих пучков;

λ — длина волны.

Как видно из соотношения (1), амплитуда суммарного колебания меняется по закону косинуса и при постоянстве длины волны зависит от разности хода l , которая в свою очередь при неизменной длине закрытого плеча определяется как удвоенное расстояние от отражающего зеркала до антенны.

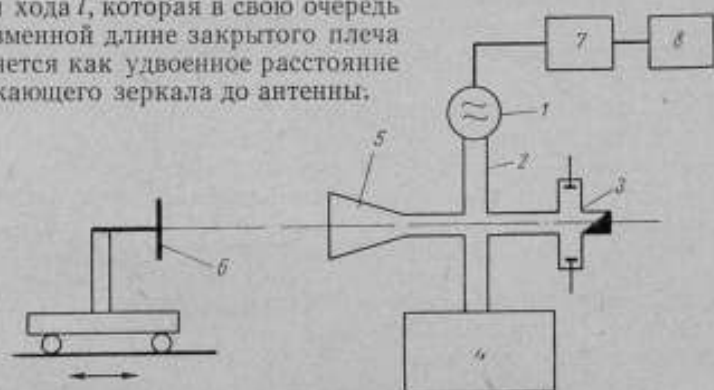


Рис. 1. Схема радиointерферометра ХГНИИМ

1 — источник; 2 — делитель; 3 — интерференционный аттенуатор; 4 — система индикации; 5 — рупорная антенна; 6 — зеркало; 7 — измерительная система; 8 — кварцевый генератор.

При перемещении отражающего зеркала вдоль оси антенны в делителе будут возникать интерференционные минимумы и максимумы, наблюдаемые с помощью системы индикации 4. Расстояние между двумя соседними минимумами или максимумами будет соответствовать перемещению зеркала на длину, равную $\lambda/2$, что нетрудно определить из соотношения (1).

В отличие от оптических интерферометров, где длина волны излучения источника известна и является постоянной величиной, длину волны радиointерферометра определяют из соотношения

$$\lambda = \frac{c}{nf}, \quad (2)$$

где c — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме (скорость света);

n — показатель преломления;

f — частота колебаний.

Как видно из этого соотношения, длина волны излучения радиointерферометра зависит от частоты источника. Известной величиной в этом случае является константа c , через значение которой и определяют длину волны λ .

Частоту излучения источника измеряют путем сличения ее с частотой образцового 100-кГц высокостабильного кварцевого генератора 8, умно-

женной до рабочей частоты радиоинтерферометра измерительной системой 7.

Показатель преломления воздуха определяют на рабочей частоте с помощью специально разработанного для этой цели объемного резонатора и находят из соотношения

$$n - 1 = \frac{f_{\text{вак}} - f_{\text{возд}}}{f_{\text{возд}}}, \quad (3)$$

где $f_{\text{вак}}$ — собственная частота эвакуированного резонатора;
 $f_{\text{возд}}$ — собственная частота объемного резонатора, заполненного окружающим воздухом.

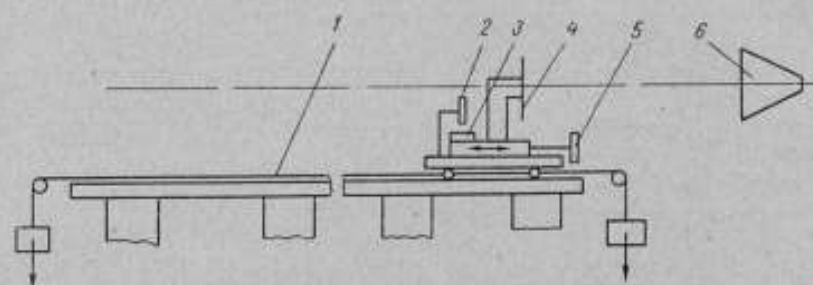


Рис. 2. Схема радиоинтерферометра.

1 — ленточная мера длины, 2 — отсчетный микроскоп, 3 — шкала, 4 — зеркало, 5 — микроскоп ниводки, 6 — антенна.

На радиоинтерферометре можно измерять как штриховые, так и концевые меры длины. Штриховые меры (рулетки, ленты, мерные проволоки) натягивают с помощью груза между направляющими, каретку в этом случае устанавливают путем визирования на меру с помощью микроскопа 2, укрепленного на каретке (рис. 2).

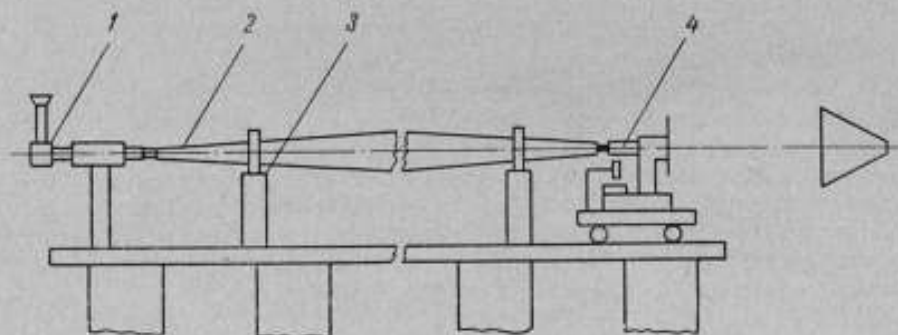


Рис. 3. Схема измерительной машины.

1 — оптиметр, 2 — нутромер, 3 — люнет, 4 — пиноль.

Концевые меры измеряют так же, как на измерительной машине (рис. 3). Меру устанавливают на люнетах 3, в качестве отсчетного устройства применяют трубку 1 оптиметра.

Длину на радиоинтерферометре измеряют следующим образом. После установки каретки в одно из крайних положений компенсируют отраженный от зеркала сигнал, т. е. устанавливают интерференционный минимум. Затем каретку перемещают в другое крайнее положение, где ее закрепляют на направляющих.

Вследствие того, что радиointерферометр имеет максимальную чувствительность только в моменты полной компенсации сигнала, зеркало перемещают к ближайшему минимуму (для этой цели зеркало установлено на подвижном столике); величину этого перемещения измеряют с помощью стеклянной шкалы и отсчетного микроскопа, установленных соответственно на подвижном столике и основании каретки.

Измеряемую длину определяют из соотношения

$$L_n = k \frac{\lambda}{2} + \Delta, \quad (4)$$

где k — число минимумов интерференции;

Δ — смещение зеркала, отсчитанное по шкале.

Число интерференционных минимумов можно определить счетчиком, однако в этом нет необходимости вследствие того, что измеряемая длина обычно предварительно известна с точностью до $\lambda/2$.

Исследования показали, что на радиointерферометре можно измерять длины, достигающие десятков метров, со средней квадратической погрешностью $5 \cdot 10^{-7}$. При этом верхний предел измерения ограничивается лишь мощностью применяемого источника излучения.

Следует отметить, что радиointерферометр работает в дальней зоне распространения радиоволн, поэтому их фронт не является строго плоским. Вследствие этого необходимо в результаты измерений вносить так называемую дифракционную поправку, значение которой было определено в ХГНИИМ.*

Ввиду высокой точности, полученной на радиointерферометре, он был применен для измерения важной физической постоянной — скорости распространения электромагнитных волн (скорости света).

* Сямкин Г. С. Дифракционная поправка к двухлучевому радиointерферометру с закрытым ключом. «Измерительная техника», 1960, № 4.

Поступила в редакцию 20/11 1966 г.

НОВЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАРУЖНЫХ ДИАМЕТРОВ
КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ОПОЯСЫВАНИЯ

При измерении наружных диаметров свыше 2000 мм в сечениях, удаленных от торца, в основном применяется метод опоясывания. Объясняется это тем, что дуговые скобы таких размеров чрезвычайно громоздки и тяжелы, а линейные скобы можно использовать для измерений только вблизи от торцов изделия.

Сущность метода опоясывания заключается в определении диаметра изделий по результатам измерения длины окружности рулеткой или специальной металлической лентой. При измерении рулеткой длину окружности определяют как разность отсчетов по двум ветвям рулетки в любом месте их совпадения, а при измерении лентой — как сумму длины ленты и зазора между ее концами, определяемого с помощью набора щупов. Для обеспечения натяжения ленты к ее концам приваривают угольники (рис. 1).

Несмотря на то, что ленты * обеспечивают большую точность измерения, чем рулетки, на заводах пользуются главным образом рулетками, что объясняется следующим:

1) ленту можно использовать только как предельный калибр для контроля изделия определенного диаметра. Применять одну и ту же ленту для измерения различных диаметров (в некотором диапазоне размеров) не представляется возможным, так как зазор между концами ленты должен быть небольшим, иначе измерить его щупом не удастся, а измерять расстояние между сторонами угольников нельзя, потому что они непараллельны;

2) измерительных устройств или машин для поверки лент, а также специальных натяжных приспособлений к лентам на большинстве заводов нет.

Указанные недостатки можно легко устранить, если прикрепить к ленте шарики и измерять не зазор между концами ленты, а расстояние l между плоскостями, касательными к шарикам (рис. 2). Эти плоскости остаются взаимно-параллельными при любом расстоянии между ними, что позволяет применять одну и ту же ленту для измерения различных диаметров в некотором диапазоне размеров. Для натяжения ленты к ее концам прикреплены призмы.

Измерить расстояние между плоскостями, касательными к шарикам, а также натянуть ленту с постоянным усилием можно с помощью специального прибора ПКД-4 (рис. 3), разработанного в Ленинградском институте

* Рубинов А. Д. Измерение больших размеров в машиностроении, 2-е изд. М.—Л., Машиз, 1959.

точной механики и оптики. * Этот прибор состоит из корпуса, измерительной части, натяжного и магнитного крепежного устройств.

Корпус прибора представляет собой цилиндрическую трубу 16 с планками 2. Измерительная часть включает два микрометра 1 и электрическое сигнальное устройство. При соприкосновении измерительной поверхности микрометрического винта с поверхностью шарика 4 ленты 3 зажигается сигнальная лампочка. Для подключения сигнального устройства в корпус прибора вмонтирована штепсельная розетка 17. Микрометры изолированы от корпуса прибора втулками 9.

Натяжное устройство состоит из винта 15 с правой и левой резьбой, по которой перемещаются две губки 14 с подпружиненными штырями 8, и приспособления для обеспечения постоянства натяжения (типа трещотки). Это приспособление включает рукоятку 10 с торцовыми зубьями, свободно сидящую на гладкой части винта 15, и прикрепленный к винту стакан 13 с двумя отверстиями, в каждом из которых расположена пружина 11 и палец 12 со скосом на конце. Под действием пружины скос пальца входит между зубьями рукоятки, благодаря чему при повороте ее поворачиваются стакан 13 и винт 15. При этом обе губки 14 одновременно перемещаются по на-

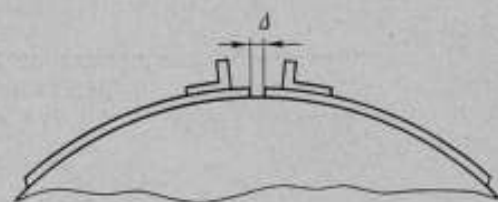


Рис. 1. Измерительная лента с угольниками.

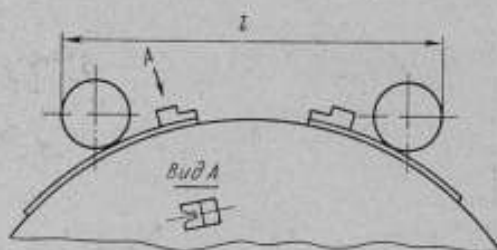


Рис. 2. Измерительная лента с шариками и призмами.

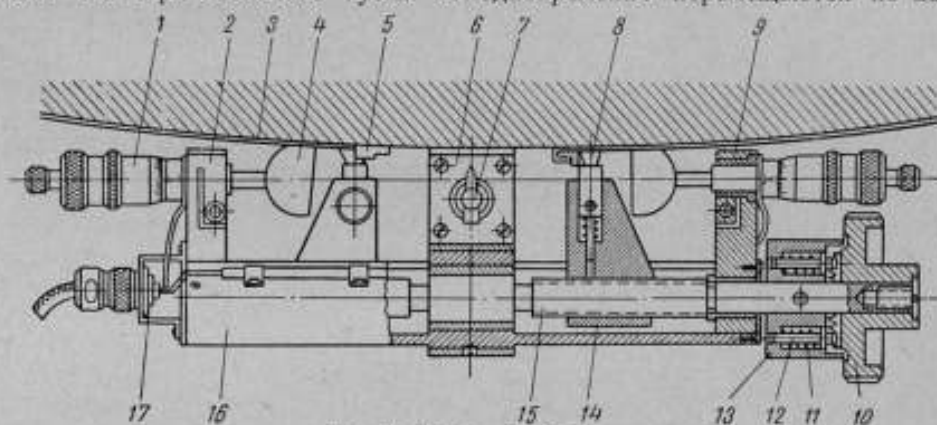


Рис. 3. Прибор ПКД-4.

правление к микрометрам или от них. Винт вращается, и соответственно губки перемещаются до тех пор, пока усилие натяжения ленты за призмы 5 не окажется уравновешенным усилием пружины трещотки.

Закрепляется прибор на измеряемом изделии с помощью постоянного магнита 6, связанного с корпусом прибора, что облегчает измерение диа-

* Рубинов А. Д. Авторское свидетельство № 197186 от 30 марта 1967 г. «Бюллетень изобретений», 1967, № 12.

метров изделий как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. Магнит* имеет выключатель 7.

Прибор с комплектом измерительных лент можно применять для измерения любых диаметров деталей в пределах 1500 ÷ 7500 мм. При этом верхний предел ограничивается возможностями поверки лент (на 12-метровой измерительной машине ВНИИМ можно поверить ленту длиной до 24 м).

С каждой лентой можно производить измерения в диапазоне до 50 мм (предел измерения двух микрометров). Для увеличения этого диапазона необходимо удлинить корпус прибора и применить в микрометре сменные наконечники.

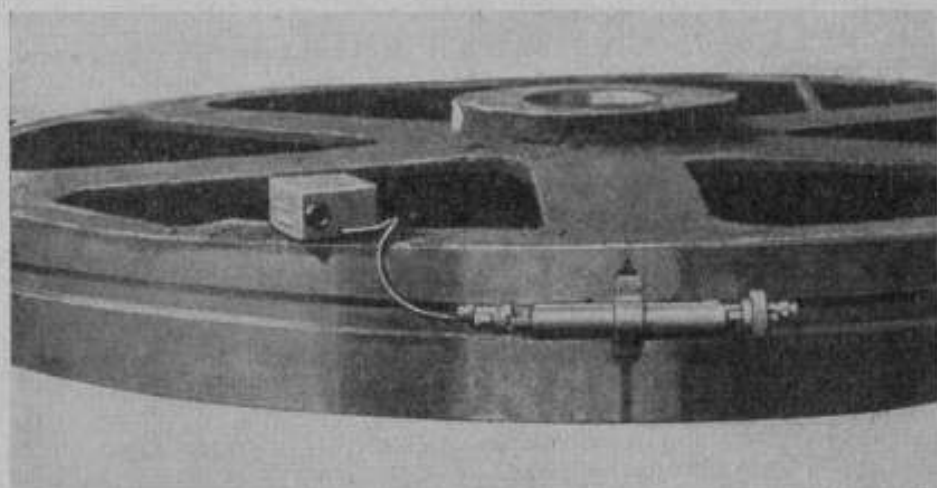


Рис. 4. Измерение прибором ПКД-4 диаметра диска.

При измерении диаметра детали прибор прикрепляют с помощью магнита к ее поверхности (рис. 4), опоясывают вокруг детали ленту, ориентируя ее по круговой риске; заводят призмы ленты за натяжные штыри прибора и натягивают ее, вращая рукоятку трещотки. Затем к поверхности шариков ленты поочередно подводят измерительные плоскости микрометров (до зажигания лампочки сигнального устройства) и производят отсчет по их шкалам.

Расстояние между шариками ленты определяют по формуле

$$l = a_1 + a_2 + C, \quad (1)$$

где a_1 и a_2 — отсчеты по шкалам микрометров;

C — постоянная прибора (расстояние между измерительными плоскостями винтов микрометров при нулевых отсчетах по шкалам).

Ленту измеряют на измерительной машине типа ИЗМ с помощью специального устройства ППЛ по схеме рис. 5, а. Ее опоясывают вокруг двух дисков, затем с помощью прибора ПКД-4 натягивают и измеряют расстояние l_1 между шариками. Расстояние L_1 между наружными поверх-

* Магнит разработан и изготовлен на кафедре технологии машиностроения Ленинградского инженерно-экономического института.

ностями дисков определяют по шкалам машины. После этого вычисляют расстояние между точками *A* и *B* («длину» *L* — рис. 5, б) ленты по формуле

$$L = 2(L_1 - d_1) + \pi(d_1 + t) - l_1 \quad (2)$$

где d_1 — диаметр диска;

t — толщина ленты.

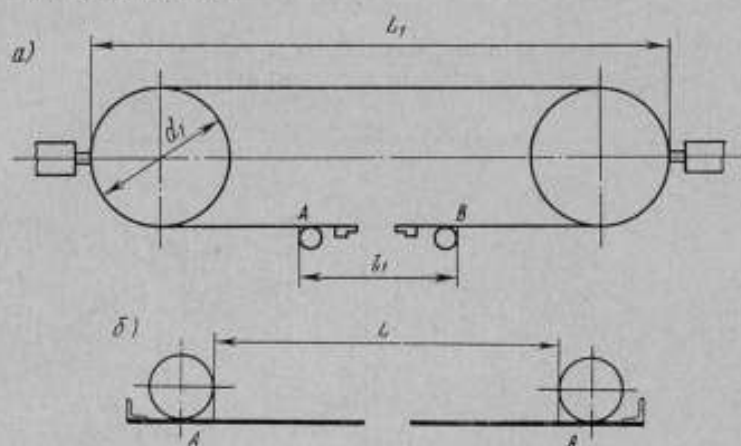


Рис. 5. Схема поверки ленты на измерительной машине:
а — измерение длины ленты на машине; б — поверяемая лента.

Устройство для поверки лент ППЛ (рис. 6) состоит из трех стоек 1—3, устанавливаемых на станине измерительной машины. На стойках 1 и 3 расположены диски 6, опоясываемые лентой 5 при ее поверке.

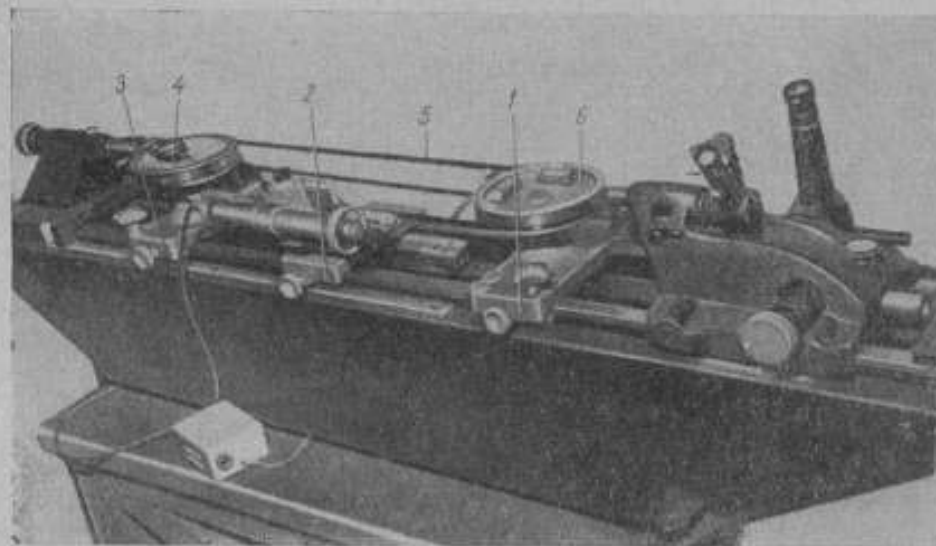


Рис. 6. Устройство для поверки лент ППЛ

Стойка 2 представляет собой основание с угольником, к которому прикрепляют магнитом прибор ПКД-4. Внутри диска стойки 3 расположена измерительная головка 4, наконечник которой должен контактировать с измерительным наконечником пиноля машины. Этим обеспечивается

постоянство усилия прижима измерительного наконечника пинцета к диску. Измерительную головку предварительно устанавливают на нуль по ленте, опоясывающей диск.

Диаметр D измеряемой детали определяют по формуле (рис. 7)

$$D = \frac{L + d + l_2}{\pi} - l, \quad (3)$$

где d — диаметр шарика, прикрепленного к ленте;
 l_2 — длина дуги окружности между точками E и F .

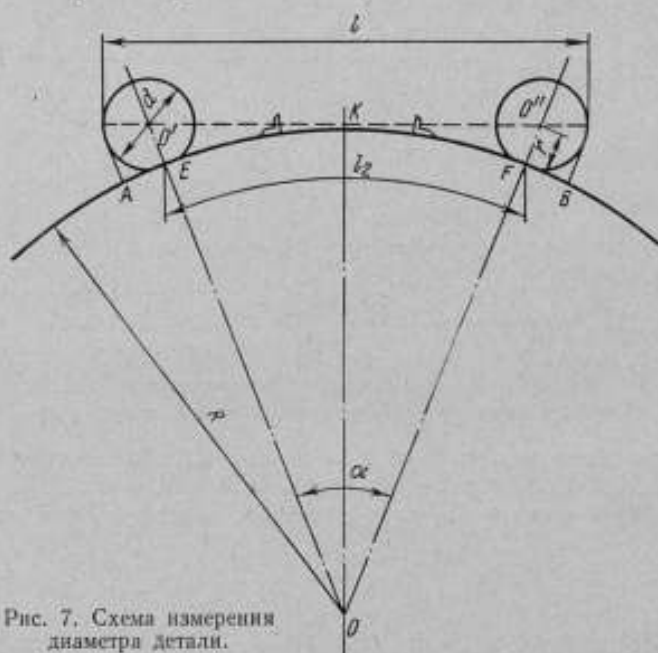


Рис. 7. Схема измерения диаметра детали.

Длину дуги l_2 можно подсчитать по формуле

$$l_2 = \pi D_{\text{ном}} \frac{\alpha}{360}, \quad (4)$$

где $D_{\text{ном}}$ — номинальный диаметр измеряемой детали.
 Угол α вычисляют по формуле

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{O'K}{O'O} = \frac{l - d}{2(R + r)}, \quad (5)$$

где l — расстояние между шариками;

$$R = \frac{D_{\text{ном}}}{2};$$

r — расстояние от центра шарика до нижней поверхности ленты.

Расчетные формулы можно упростить. Из формул (2) и (3) можно исключить величину l , так как при подстановке в формулу (3) вместо L ее значения по формуле (2) получаем значения πl со знаками плюс и минус. Тогда формула для определения длины ленты примет вид:

$$L = 2(L_1 - d_1) + 3,1416d_1 - l_1 = 2L_1 + 1,1416d_1 - l_1 = 2L_1 - l_1 + k_1,$$

где $k_1 = 1,1416d_1$ — постоянная величина.

Аналогично диаметр детали определяют по формуле

$$D = \frac{L+d}{\pi} + \frac{l_2}{\pi} = k_2 + \frac{\pi D_{\text{ном}} \alpha}{\pi \cdot 360 \cdot 60} = k_2 + k_3 \alpha. \quad (7)$$

В формуле (7) угол α — в минутах;

$$k_2 = \frac{L+d}{\pi} \text{ — постоянная для данной ленты;}$$

$$k_3 = \frac{D_{\text{ном}}}{360 \cdot 60} \text{ — постоянная для данного номинального диаметра.}$$

Формулу (5) можно представить в виде

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{l}{k_4} - k_5, \quad (8)$$

где $k_4 = 2(R-r)$, а $k_5 = \frac{d}{k_4}$.

Постоянные $k_1 + k_5$ можно подсчитать заранее, что позволит упростить и ускорить вычисление диаметра по результатам измерения прибором ПКД-4. Дальнейшего упрощения можно достигнуть, предварительно составив расчетные таблицы.

При испытании на заводе опытного образца прибора ПКД-4 было проведено несколько серий измерений шести деталей с диаметрами от 1400 до 2600 мм. Каждая серия включала от 5 до 60 измерений. Кроме того, каждая деталь была измерена по несколько раз индикаторной скобой и методом опоясывания с помощью аттестованной рулетки. Измерительные ленты аттестовывали на измерительной машине завода с помощью устройства ППЛ и прибора ПКД-4.

Результаты испытаний показали следующее:

1. Расхождения между результатами измерения прибором и индикаторной скобой не превышают 0,04 мм при измерении деталей с чистотой поверхности порядка $\nabla 6$ — $\nabla 7$ и 0,08 мм — при измерении деталей с грубой поверхностью ($\nabla 2$ — $\nabla 3$).

Расхождения между результатами измерения аттестованной рулеткой и индикаторной скобой доходят до 0,35 мм.

2. Разброс результатов измерения при проверке лент и при измерении диаметров деталей находится в пределах 0,02÷0,2 мм, что в переводе на диаметр составляет от 0,006 до 0,06 мм.

При теоретическом расчете погрешностей измерения прибором ПКД-4 была получена суммарная погрешность, равная $\pm 40 \cdot 10^{-6} D$, т. е. $\pm 0,04$ мм на каждый метр измеряемого диаметра.

Прибор ПКД-4 можно рекомендовать для измерения диаметров деталей 3-го класса точности и грубее.

Поступила в редакцию 17/1 1967 г.

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Температурный коэффициент удлинения является одной из важных физических характеристик материала и представляет интерес как для исследователей, изучающих свойства материалов в широком диапазоне температур, так и для конструкторов, проектирующих детали узлов и соединений, работающих в условиях переменных температур.

Успехи науки и техники потребовали знания различных характеристик материалов в области не только высоких, но и низких температур.

Все существующие методы определения температурных коэффициентов удлинения подразделяют на:

абсолютные — изменение длины образца при изменении температуры измеряют непосредственно в единицах принятой системы;

относительные — изменение длины образца при изменении его температуры сравнивают с аналогичным изменением длины меры, температурный коэффициент которой хорошо изучен.

Эти методы можно осуществлять в статическом температурном режиме, когда длину и температуру образца измеряют после длительной выдержки его при заданной температуре, или в динамическом режиме, когда длину и температуру образца измеряют в процессе изменения температурного режима в заданном интервале температур.

Установка для исследования теплового расширения твердых материалов при низких температурах должна содержать устройства для измерения температуры, длины или удлинения образца и криостат для создания низких температур.

Используемые в нашей стране dilatометры для определения температурных коэффициентов удлинения при низких температурах весьма разнообразны как по конструкции, так и по точности получаемых на них результатов. Dilатометры, работающие в области низких температур, не поверяют в метрологических институтах из-за отсутствия средств и методов поверки. Следовательно, получаемые на них результаты не могут быть сравнены между собой, поскольку неизвестна точность этих приборов.

В соответствии с разработанным во ВНИИМ проектом поверочной схемы для средств измерения температурных коэффициентов удлинения создана dilatометрическая установка ДИН-3, которая может служить в качестве эталонной в интервале температур от -190 до $+20^\circ\text{C}$.

Определение температурных коэффициентов удлинения на этой установке по поверочной схеме должно производиться абсолютным методом

в стационарных температурных условиях с погрешностью не более $(2 \div 3) \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$. Расчеты показывают, что для обеспечения такой точности необходимо, чтобы длина образца была измерена с погрешностью не более 0,05 мкм, а температура — с погрешностью не более 0,01 град. Такую точность при измерении длины образца можно получить, лишь используя интерференцию света, т. е. на интерференционном dilatометре.

Интерференционные dilatометры позволяют определять удлинение образцов размером от 3 до 20 мм. В этом большое их преимущество перед другими dilatометрами, так как при небольших по размеру образцах можно получить хорошее температурное поле. Образец, заключенный между двумя пластинами, помещают в камеру, внутри которой можно получить желаемую температуру, и освещают параллельным пучком света. При небольших углах наклона между нижней поверхностью верхней пластины и верхней поверхностью нижней пластины возникают интерференционные полосы равной толщины. При изменении температуры наблюдают смещение интерференционных полос, пропорциональное изменению длины образца.

Известно несколько конструкций интерференционных dilatометров. При низких температурах такой прибор одним из первых применил Х. Дорсей [1]. Он помещал специальную камеру с образцом в сосуд Дьюара и, регулируя глубину погружения камеры в хладагент, получал промежуточные температуры от -190 до $+20^\circ \text{C}$. Для измерения температуры образца служил медный термометр сопротивления. Х. Дорсей установил, что средняя квадратическая погрешность определения температурного коэффициента удлинения равна $3 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$. Недостатками прибора Х. Дорсея являются невозможность получения любых промежуточных температур и поддержания их постоянными в течение длительного времени, неудобство установки образца, вызывающее значительные погрешности (10—20%).

Интерференционный метод измерения удлинения в интервале от -190 до 750°C использовали Ф. Никс и Д. Мак-Найер [2]. В их dilatометре предусмотрена фоторегистрация интерференционных полос. Образец помещали в массивную медную камеру 4 (рис. 1), которую с помощью тонкостенной латунной трубки 3 закрепляли на горизонтальной плите. Скорость подачи хладагента в сосуд Дьюара регулировали терморпарой 2 и специальным регистрирующим потенциометром. Это давало возможность получать желаемую скорость охлаждения образца. Абсолютную температуру образца измеряли медь-константановой терморпарой 1. Для определения изменения температуры служил интерференционный термометр. В dilatометре не предусмотрена возможность определения температурных коэффициентов удлинения в стационарных условиях, а также затруднена установка образца. Погрешность определения температурных коэффициентов удлинения на этом приборе — порядка $1 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$.

Криостат более сложной конструкции применили в интерференционном dilatометре Т. Рубин, Х. Альтман и Х. Джонстон [3]. При исследовании образец устанавливали в массивный медный контейнер 10 (рис. 2), который находился внутри герметичной камеры 9 и закрывался вакуумноплотным окном 3. Камеру 9 с помощью тонкостенной никелевой трубки 5 подвешивали в криостате 2, наполненном жидким гелием. Медные блоки 6, 8, 11 экранировали контейнер от тепловой радиации от стенок камеры 9 и компенсировали утечку тепла по электрическим выводам и трубкам. Тепловой фильтр 7 уменьшал потери тепла от радиации по трубке 5.

Для поддержания температуры контейнера постоянной в течение длительного времени блоки снабжены манганиновым нагревателем и медь-кон-

стантановой термопарой, которая являлась датчиком для терморегулятора. На контейнер 10 намотана золотая проволока, играющая роль нагревателя и термометра сопротивления одновременно. Для улучшения теплового контакта между образцом и контейнером служил газообразный гелий, вводимый в контейнер через трубку 4. Абсолютную температуру контейнера измеряли медь-константановой термопарой 1 с погрешностью

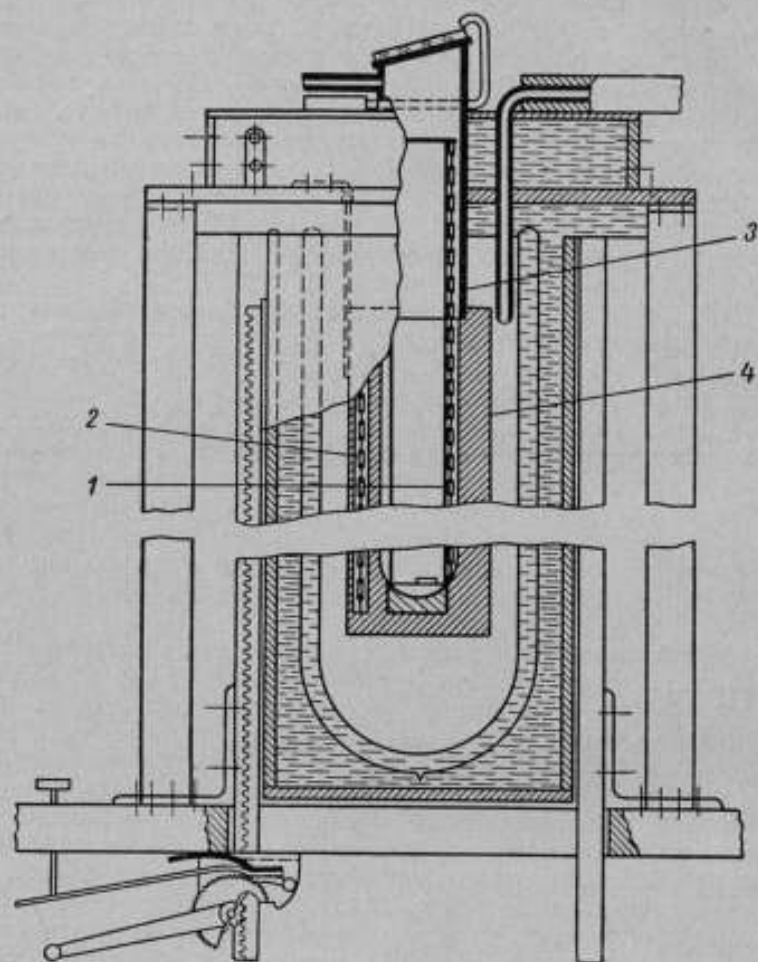


Рис. 1. Криостат интерференционного dilatометра Ф. Никса и Д. Мак-Найера.

не более $0,03$ град, а изменение температуры — термометром сопротивления с погрешностью $\pm 0,005$ град.

В dilatометре Т. Рубина и Х. Альтмана для измерения длины применена натриевая лампа с длиной волны $\lambda = 0,5896$ мкм. Процесс установки образца крайне сложен и требует больших затрат времени.

Абсолютный интерференционный dilatометр ВНИИМ ДИН-3 состоит из устройств для измерения длины образца и его температуры, криостата и терморегулятора (рис. 3). На этом dilatометре длину образца измеряют методом совпадения дробных частей порядков интерференции с погрешностью $0,01$ мкм [4]. Предварительно образец длительное время выдерживают при требуемой температуре, что повышает точность измерения температур-

ных коэффициентов удлинения, так как в этом случае температура теплоприемника ближе к температуре образца.

Для измерения абсолютной температуры образца в dilatометре ДИН-3 применен платиновый термометр сопротивления специальной конструкции. Это позволило ввести чувствительный элемент последнего в отверстия нижней пластины и образца, что повысило точность измерения температуры. Положительным в конструкции криостата ВНИИМ является то, что образец устанавливается на столике, который закреплен неподвижно относительно оптической части. Это отличает его от всех рассмотренных выше криостатов, облегчает и ускоряет установку образца и значительно снижает погрешности, возникающие по этой причине.

Испытуемый образец помещают в криостат между двумя пластинами из прозрачного плавленого кварца. Поверхности пластин должны быть доведены таким образом, чтобы отклонения от плоскостности не превосходили 0,1 микрон. Нижняя поверхность нижней пластины матирована, а поверхности верхней пластины должны быть наклонены друг к другу под углом порядка $20'$. Образец изготовлен так, чтобы он соприкасался с каждой из пластин в трех точках. Длину образца определяют по разности хода двух интерферирующих пучков монохроматического света, отражающихся от верхней поверхности нижней пластины и нижней поверхности верхней пластины. Так как опорные поверхности образца не параллельны между собой, то при освещении интерферометра параллельным пучком света наблюдаются интерференционные полосы равной толщины.

Для снижения погрешности измерения длины образца в dilatометре ДИН-3 предусмотрена возможность исследований в вакууме, что исключает необходимость введения поправки на длину волны, связанной с изменением температуры и давления. Кроме того, камеру, где помещен образец, можно заполнять газообразным гелием.

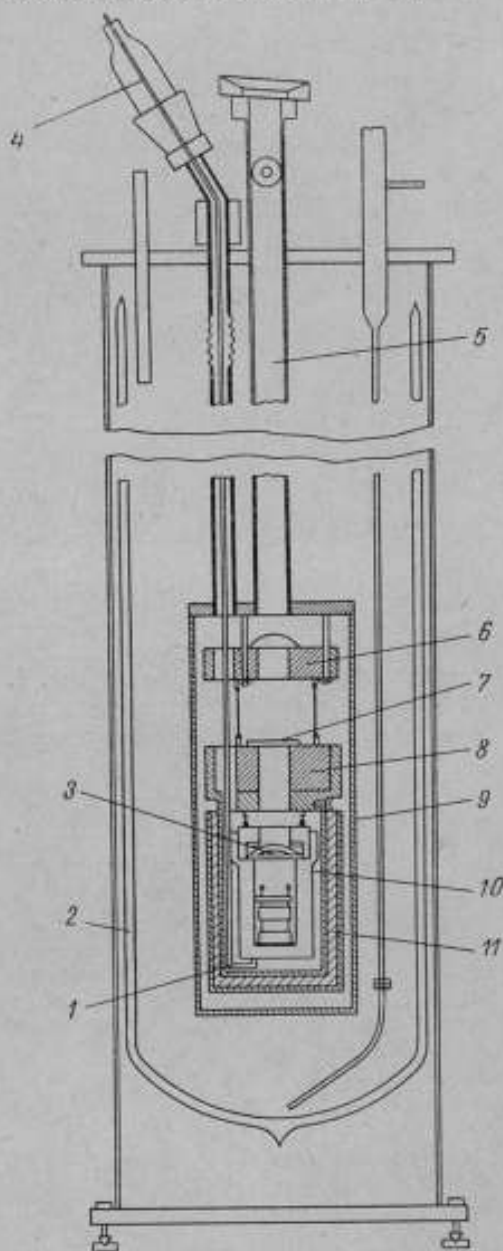


Рис. 2. Криостат к абсолютному интерференционному dilatометру Т. Рубина, Х. Альтмана и Х. Джонстона.

Устройство для измерения длины образца смонтировано на специальной плате, которая тремя регулировочными винтами опирается на платформу, имеющую приспособление для перемещения в двух взаимно-пер-

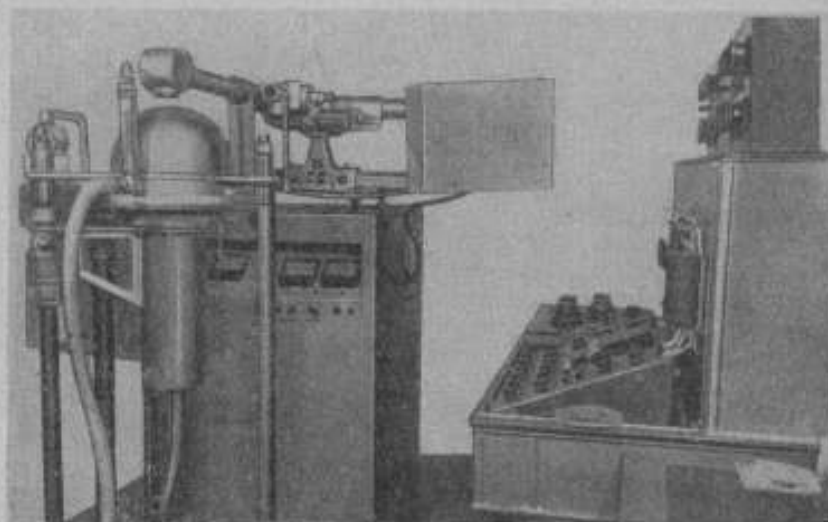


Рис. 3. Общий вид интерференционного дилатометра ВНИИМ.

пендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости. Оптическая схема устройства показана на рис. 4.

Источник монохроматического света через конденсор 11 освещает входную щель монохроматора 10, находящуюся в фокусе объектива 9. Пройдя

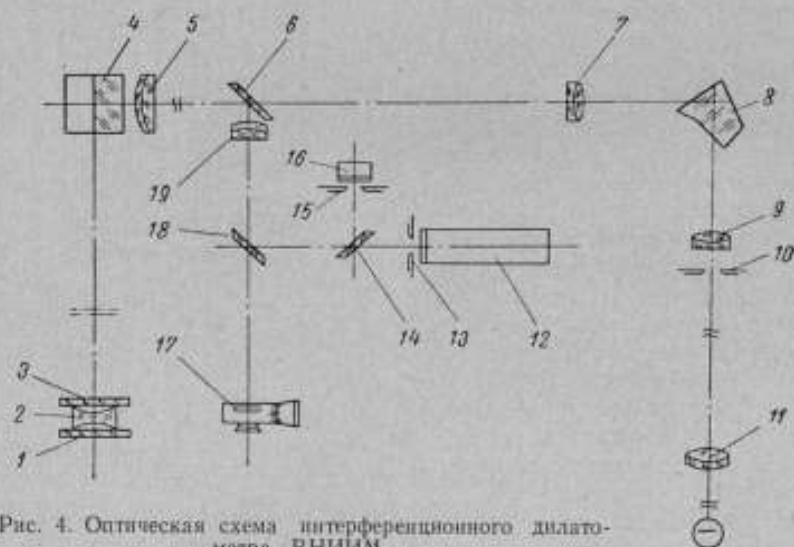


Рис. 4. Оптическая схема интерференционного дилатометра ВНИИМ.

дисперсионную призму 8 и объектив 7, пучок света собирается в плоскости выходной щели, расположенной в фокусе объектива 5. Щель прорезана в плоскопараллельной пластине 6. После объектива 5 пучок света попадает на призму 4, которая направляет его на образец 2, заключенный между

пластинами 1 и 3. Лучи от интерференционной картины направляются призмой 4 в объектив 5, по выходе из которого фокусируются объективом 19. Изображение интерференционной картины, расположенной в заднем фокусе объектива 19, можно рассматривать через окуляр-микрометр 17. В оптической схеме дилатометра предусмотрена возможность применения двунаправленного счетчика интерференционных полос (12—16, 18). В качестве источников света использованы лампы с Cd или ^{114}Cd .

На рис. 5 схематически изображен криостат, в который помещают испытуемый образец 2. Образец устанавливают на столике 1 через окно 3. Для удобства установки столик крепят с помощью труб 4, 5, 6 к неподвижной плате 7, а сосуды Дьюара 18 и 24 перемещают в вертикальном направлении. Для того чтобы избежать смещения столика при охлаждении, верхняя часть трубы выполнена из инвара, а средняя часть — из плавящего кварца. Такая конструкция позволяет быстро и многократно устанавливать образец. Повторение интерференционной картины при этом указывает на правильность установки образца и отсутствие посторонних включений между ножками образца и пластинами. Возможность контроля за установкой образца повышает надежность измерений.

Температуру образца измеряют платиновым термометром сопротивления 22, который вводят в него через отверстие в столике и нижней пластине. Сопротивление платинового термометра измеряют на высокоточном потенциометре Р308. Для контроля температурного поля по высоте образца предусмотрена дифференциальная термопара.

К плате 7, на которой закреплен столик, притирается вакуумноплотный колпак 10, выполненный из непрозрачного плавящего кварца. В верхней части колпака находится прозрачный кварцевый экран 11, через который свет попадает на испытуемый образец. Чтобы избежать подвода тепла излучением, в трубе столика предусмотрены два теплофильтра 12, а для уменьшения подвода тепла по соединительным проводам последние выбраны с наименьшим диаметром и проходят через массивный металлический предохранительный блок. Для уменьшения подвода тепла по стенкам трубы, поддерживающей столик, центральная часть ее выполнена из плавящего кварца и снабжена рядом выточек. Сосуд Дьюара 24 закреплен в кожухе 23 на плате 16, которая может перемещаться по вертикальным направляющим

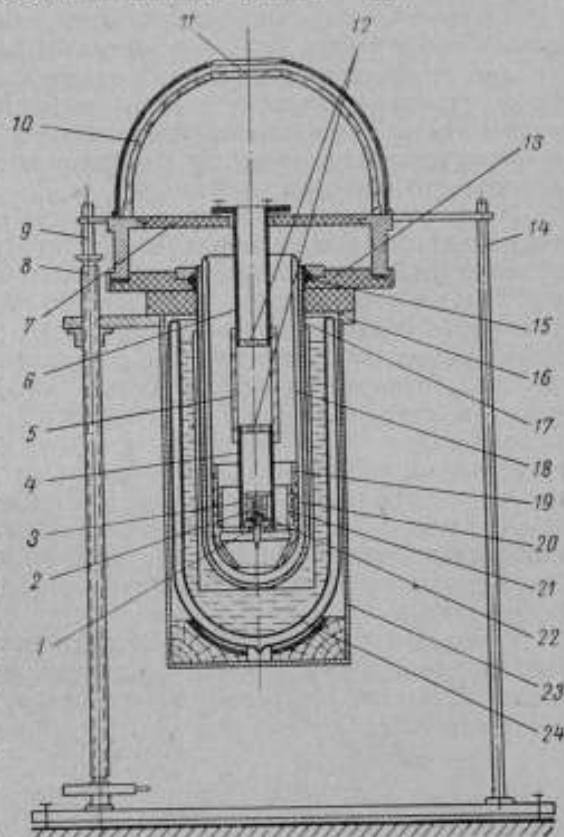


Рис. 5. Криостат к интерференционному дилатометру ВНИИМ.

9 и 14 с помощью винта 8. На той же плате с помощью платы 13, уплотнения 15 и стакана 17 закреплен центральный стеклянный сосуд Дьюара 18, между стенками которого может быть создан вакуум порядка 10^{-5} мм рт. ст. Для выравнивания температурного поля на дне центрального сосуда установлен массивный медный блок 19, содержащий нагреватель 20 и платиновый термометр сопротивления 21. Последний является датчиком терморегулятора.

Термометр сопротивления включают в одно из плеч моста P329, в диагональ которого подсоединяют зеркальный гальванометр M17/1. При равновесии моста световое пятно гальванометра освещает фотосопротивление. После усиления фототока срабатывает реле, которое управляет работой нагревателя. Такая конструкция криостата позволяет получать любые промежуточные температуры и поддерживать их постоянными в течение длительного времени.

После установки образца на столике окна закрывают экранами из меди и плату 16 поднимают, а зазор между подвижной 13 и неподвижной 7 платами уплотняют. Воздух откачивают из-под колпака до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и из центрального сосуда 18 — до $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. В сосуд 24 через штуцер заливают хладагент. Регулируя степень разрежения между стенками сосуда 18 и подбирая специальные режимы нагревателя, добиваются теплового равновесия. При этом количество теплоты, теряемое камерой, в которую помещен образец, вследствие излучения и теплопроводности через стенки центрального сосуда компенсируется регулируемым притоком к камере тепла от нагревателя. Длину образца измеряют после выдержки при данной температуре в течение 30—40 мин.

Результаты предварительного исследования низкотемпературного интерференционного dilatометра ДИН-3 дают основание утверждать, что погрешность измерения на нем длины образца не превосходит 0,01 мкм, а температуры 0,01 град.

Таким образом, во ВНИИМ создан интерференционный dilatометр, позволяющий определять температурные коэффициенты удлинения абсолютным методом в стационарных температурных условиях в интервале $(-190) + (+20)$ °C.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dorsey H. Coefficient of linear expansion at low temperatures. «Phys. Rev.», 1907, v. 25.
2. Nix F. C. and Mac Naig D. An. Interferometric-Dilatometer with Photographic Recording. «Rev. Sci. Instr.», 1941, v. 12, № 2.
3. Rubin T., Altman H. W. and Johnston H. L. Coefficients of Thermal Expansion of Solids at Low Temperatures. «J. Amer. Chem. Soc.», 1954, v. 76, № 21.
4. Романова М. Ф. Интерференция света и ее применение. ОНТИ, М.—Л., 1937.

Поступила в редакцию 29/XI 1966 г.

Е. П. АЛЕКСЕЕВА, М. Г. БОГУСЛАВСКИЙ
Т. И. КАЛНИНА

ВНИИМ

УДК 531.715.27 : 531.717.82

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНЕЙКИ ИС-36

В связи с созданием высокоточных станков, машин и приборов резко повысились требования к прямолинейности направляющих. Существующие методы контроля прямолинейности очень трудоемки и не всегда удовлетворяют требованиям промышленности. В Государственном оптическом институте создан новый прибор — так называемая оптическая линейка ИС-36

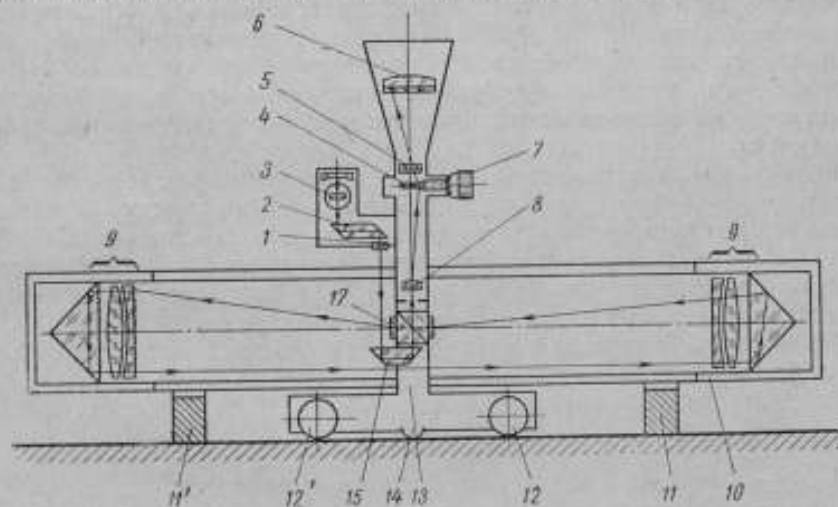


Рис. 1. Схема оптической линейки ИС-36.

1, 2, 3, 15 — элементы осветительной системы; 4 — пластина с бисектором; 5 — проекционный окуляр; 6 — коллетив; 7 — микрометр; 8 — микрообъектив; 9 — зеркально-линзовые объективы; 10 — корпус прибора; 11 и 11' — опоры корпуса; 12 и 12' — ролики; 13 — измерительная каретка; 14 — измерительный наконечник.

(рис. 1) для контроля прямолинейности, которая благодаря своей простой конструкции, разработанной Б. М. Левиным, нашла широкое применение в заводских лабораториях и цехах.

Принцип действия этого прибора заключается в измерении отклонений от прямолинейности поверяемых поверхностей относительно исходной оптической оси, создаваемой зеркальной афокальной автоколлимационной оборачивающей системой.

Измерительная каретка оптической линейки перемещается по поверяемой поверхности, соприкасаясь с нею измерительным наконечником (шупом) и одним из двух роликов. В качестве отсчетного устройства применен винтовой окулярный микрометр.

Задачей исследования оптической линейки ИС-36 являлось определение точности, области применения и метода поверки ее.

Погрешности измеряемой линейки ИС-36 определены как для метода непосредственной оценки, так и для графического метода, осуществляемых с помощью линейки. При этом показания линейки сравнивали с действительными значениями разностей длин блоков концевых мер длины, из которых была составлена образцовая поверхность.

При ожидаемой погрешности измерения ± 1 мкм предельная погрешность аттестации блоков образцовых мер не должна была превышать $\pm 0,3$ мкм. Поэтому блоки были составлены из концевых мер 3-го разряда и качество притирания мер в блоке дополнительно контролировали измерением блоков техническим интерференционным методом. Блоки концевых мер 3 (номинальной длины 3 мм) притирали к вспомогательной плоской стеклянной линейке 4 длиной 0,5 м (рис. 2). Положение верхних измерительных поверхностей мер в одной плоскости контролировали по интерференционным полосам равной толщины с погрешностью 0,3 мкм, накладывая стеклянную пластину со скосом. Линейка 4 лежала на опорах, расположенных на расстоянии 0,2231 от ее концов, что обеспечивало ее наименьший прогиб.

Положение линейки ИС-36 было отрегулировано вращением микровинта подвижной опоры 2 так, чтобы в крайних точках *O* и *K*, находящихся соответственно на противоположных концах образцовой поверхности, показания отсчетного устройства (микрометра) были одинаковы. В этом случае считали, что исходная прямая (оптическая ось *I*) прибора параллельна прямой, которую можно провести между двумя крайними точками поверхности.

Погрешность Δ оптической линейки определяли при трех положениях измерительной каретки (рис. 2): в центре линейки между интервалами шкалы 625 ÷ 975 мм (*a*, *b*, *в*) и по двум ее концам в пределах 290 ÷ 665 и 980 ÷ 1360 мм (*г*). В последних случаях применяли две алогичные вспомогательные стеклянные линейки (4 и 4'). При определении погрешности пользовались плоским и сферическим наконечниками.

Погрешность Δ определяли по разностям действительных длин блоков мер с номинальными значениями $h_{ном} = 0, \pm 10, \pm 70, \pm 100, \pm 200, \pm 300, \pm 400$ мкм из выражения

$$\Delta = h_{изм} - h_{д}$$

где $h_{изм}$ — измеренное отклонение от прямолинейности;

$h_{д}$ — действительное значение разности длин блоков концевых мер.

При сохранении в процессе измерения равенства отсчетов в точках *O* и *K* значения $h_{изм}$ находили по выражению

$$h_{изм} = a_i - a_0 \quad (1)$$

где a_i — среднее значение из отсчетов по отсчетному устройству, соответствующее установке измерительной каретки в поверяемой точке *i* образцовой поверхности;

a_0 — среднее значение из отсчетов до начала и после окончания измерения, соответствующее установке измерительной каретки в точке *O*.

При обнаружении некоторого перекоса оптической линейки относительно образцовой поверхности, контролируемого после окончания измерения по совпадению отсчетов в точках *O* и *K*, в значение $h_{изм}$, а следовательно, и в значение Δ вошла систематическая погрешность, которую можно исключить. В этом случае $h_{изм}$ вычисляли по формуле

$$h_{изм} = (a_i - a_0) - (a_k - a_0) \frac{n_i}{n_k} \quad (2)$$

где a_k — среднее значение из отсчетов до начала и после окончания измерения при установке измерительной каретки в точке K ;
 n_i и n_k — количество интервалов между точками i и O и точками O и K соответственно.

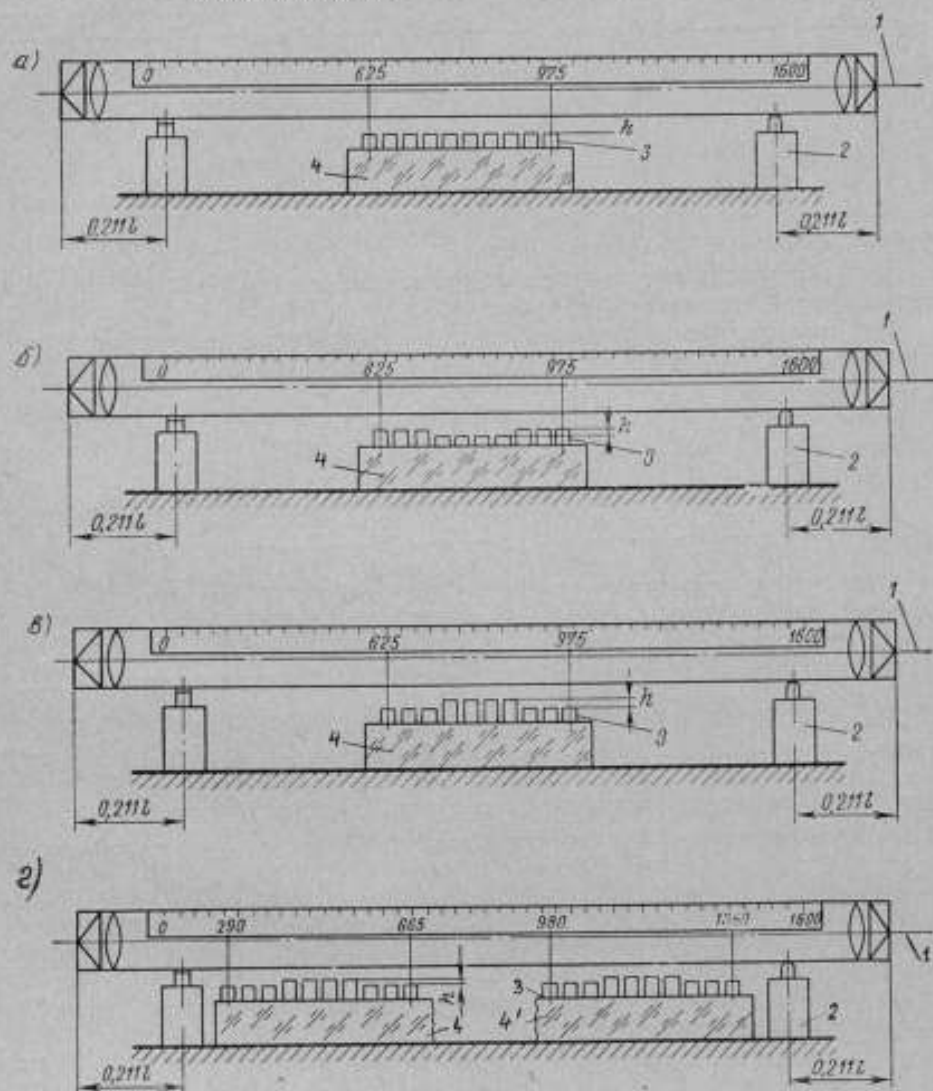


Рис. 2. Схема для определения погрешности оптической линейки.

Измерительная каретка расположена: а, б, в — в центре линейки, г — по двум ее концам.
 1 — оптическая ось корпуса; 2 — опоры; 3 — блоки конечных мер; 4 — стеклянная линейка.

Для выяснения, в каких случаях $h_{\text{н.м}}$ следует вычислять по формуле (2), чтобы исключить систематическую погрешность, вносимую перекосом, было обработано 200 измерений. На основании этого в табл. 1 указаны вычисленные значения погрешностей и даны рекомендации о введении поправок.

Значения погрешностей оптической линейки, полученные при расположении опор в точках Эри, показаны на рис. 3, из которого можно сделать следующие выводы:

Разность отсчетов a_0 и a_K по отсчетному устройству, мм	Неисключенная систематическая погрешность, мкм	Рекомендации о введении поправки
$0 \pm (\pm 0,001)$	Не более 0,2	Поправку не вводят
$\pm (0,001 \pm 0,003)$	» » 0,9	Поправку вводят во всех случаях
$\pm (0,003 \pm 0,006)$	» » 1,8	То же
Свыше $\pm 0,006$	Более 1,8	Измерения считаются неудовлетворительными

- 1) при отсутствии отклонений от прямолинейности при $h = 0$ погрешность прибора находится в пределах 1,2 мкм;
 2) с увеличением отклонений от прямолинейности погрешность пропорционально возрастает и при $h = 0,4$ мм она равна 2,5—3 мкм;

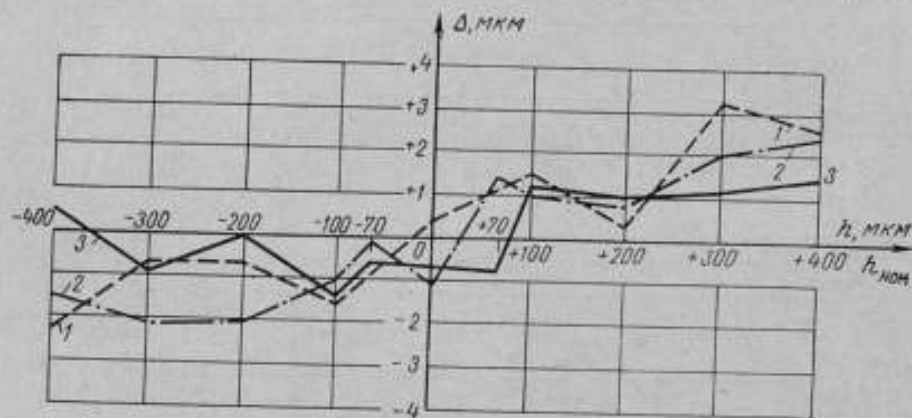


Рис. 3. Кривые погрешностей при установке измерительной каретки: 1 — на левом краю; 2 — посередине; 3 — на правом краю.

- 3) погрешность не зависит от расстояния, на котором находится измерительная каретка от объективов (кривые 1, 2, 3), т. е. разность апертур в приборе не влияет на погрешность.

На основании результатов этих исследований выведена формула погрешности линейки ИС-36:

$$\Delta_{\text{экл}} = \pm (1,2 + 4,5 \cdot 10^{-3}h) \text{ мкм.} \quad (3)$$

Первый член этой формулы, равный 1,2 мкм, определяется наибольшей погрешностью измерения при $h = 0$, которая обусловлена инструментальной погрешностью, свойственной конструкции данного прибора. Этот член формулы определен со средним квадратическим отклонением $S = 0,3$ мкм, найденным экспериментально (табл. 2). С вероятностью 0,95 погрешность результата S_x из 10 наблюдений $h = 0$ при коэффициенте распределения $t = 2,26$ будет равна $tS_x = \pm 0,2$ мкм. Отсюда и первый член формулы при вероятности 0,95 также можно считать определенным с погрешностью $\pm 0,2$ мкм.

При определении среднего квадратического отклонения погрешностей ряда наблюдений (табл. 2) найдена зависимость его не только от $h_{\text{ном}}$, но и от вида наконечника.

Таблица 2

Номинальное значение измерения отклонения от исходной прямой $\Delta_{ном}$, мкм	Применяемый наконечник	Среднее квадратическое отклонение в интервалах линейки, S мкм			
		на левом краю	в середине	на правом краю	среднее значение S
0	Сферический	0,3	0,4	0,2	0,3
0	Плоский	0,4	—	0,3	0,4
± 10	Сферический	—	0,5	—	0,4
± 10	Плоский	0,4	—	—	0,4
+70	Сферический	0,4	0,3	0,5	0,4
+70	Плоский	0,7	0,3	0,5	0,5
-70	Сферический	0,6	0,5	0,6	0,6
-70	Плоский	0,4	0,6	0,5	0,5
+100	Сферический	0,4	0,7	0,5	0,5
+100	Плоский	0,4	0,6	0,9	0,6
-100	Сферический	0,3	0,5	0,6	0,5
-100	Плоский	0,5	0,8	0,9	0,8
-200	Сферический	0,5	0,4	0,5	0,5
-200	Плоский	0,7	0,6	0,9	0,8
± 400	Сферический	—	0,7	0,8	0,7
± 400	Плоский	—	0,8	1,1	0,9

Погрешности линейки были определены при двух положениях опор:
а) в точках Эри ($0,211l$, где l — длина корпуса линейки) при расстоянии между опорами 1350 мм,

б) в средней части линейки при расстоянии между опорами 620 мм, как это рекомендовано в «Описании и руководстве к пользованию оптической линейкой».

Значения погрешностей в микрометрах при указанном расположении опор приведены в табл. 3. Из нее видно, что при расположении опор на расстоянии 620 мм возникает систематическая погрешность порядка 0,004 мм (последняя графа). Поэтому установка опор в другие точки, кроме точек Эри, недопустима за исключением поверки поверхностей, длина которых превышает 1350 мм. В этом случае опоры необходимо смещать к краям линейки, так как при этом систематическая погрешность не возникает.

Анализ составляющих погрешностей (случайных и систематических) показал следующее.

К с л у ч а й н ы м можно отнести погрешности:

δ_1 — наведения биссектора на визирный штрих;

δ_2 — возникающую от нестабильности контакта измерительного наконечника при повторных установках измерительной каретки в одно и то же положение;

δ_3 — отсчетного устройства;

δ_4 — определения цены деления отсчетного устройства.

Хотя исключение некоторых систематических погрешностей предусмотрено методикой измерения, на практике имеются и неисключенные остаточные погрешности:

Таблица 3

Разность длин блоков h_d , мкм	Расстояние между опорами 620 мкм		Опоры в точках Эри		Расхождение результатов $\delta_1 - \delta_2$
	$h_{изм}$	a_1	$h_{изм}$	a_2	
-70	-73,7	-3,7	-69,0	+1,0	-4,7
	-73,4	-3,4	-67,7	+2,3	-5,7
-100	-102,0	-2,0	-98,6	+1,4	-3,4
	-103,0	-3,0	-98,6	+1,4	-4,4
-200	-202,0	-2,0	-198,4	+1,6	-3,6
	-203,0	-3,0	-198,9	+1,1	-4,1
-400	-396,7	+3,3	-392,8	+7,2	-3,9
	-397,3	+2,7	-393,5	+6,5	-3,8

Θ_1 — из-за непараллельности оптической оси прибора относительно прямой, соединяющей крайние точки поверяемой поверхности;

Θ_2 — вызываемая разнофокусностью объективов автоколлимационной системы;

Θ_3 — от апертуры прибора;

Θ_4 — из-за касания наконечника поверяемой поверхности разными точками сферы при наклоне измерительной каретки.

К систематическим относятся также погрешности:

γ_1 — вызываемая упругой деформацией в месте контакта сферического наконечника с измеряемой поверхностью;

γ_2 — вызываемая деформацией оптической линейки из-за температурного градиента по длине.

Погрешности δ_1 , δ_2 , δ_3 и Θ_1 определены экспериментально, остальные — расчетным путем или приняты как известные для используемых в приборе стандартных узлов.

Средняя квадратическая погрешность δ_1 при расположении штриха в центре поля зрения микроскопа найдена равной $\pm 0,3$ мкм; при расположении штриха на краю поля зрения (т. е. для наибольшего предела измерения, предусмотренного конструкцией оптической линейки) $\delta_1 = \pm 0,4$ мкм. Исходя из того, что значение h определяется как разность двух отсчетов, эту погрешность следует увеличить в $\sqrt{2}$, т. е. принять равной $\delta_1 \sqrt{2}$.

Средняя квадратическая погрешность δ_2 , определенная на разных участках линейки при разных значениях h (в каждой точке сделано по 10 измерений), оказалась равной $\pm 0,5$ мкм для всех значений h . Погрешность δ_2 , как и в первом случае, принята равной $\delta_2 \sqrt{2}$.

Средняя квадратическая погрешность δ_3 отсчетного устройства (микрометра) согласно ГОСТ 6507—60 не должна превышать $\pm 1,3$ мкм. При увеличении $10\times$ в плоскости биссектора окулярного микрометра $\delta_3 = \pm 0,13$ мкм для $h = 400$ мкм. При $h = 0$ погрешность δ_3 принята равной погрешности отсчета по микрометру, предельное значение которого не превышает 2 мкм. Отсюда средняя квадратическая погрешность отсчета при увеличении $10\times$ составит всего 0,07 мкм. В том и другом случае эта погрешность рассматривается как $\delta_3 \sqrt{2}$.

Погрешность δ_4 не превысила 0,005 мкм. Цена деления отсчетного устройства и увеличение микрообъектива измерительной каретки, снятой

с корпуса линейки, были определены на универсальном микроскопе УИМ. Наблюдая изображение биссектора окуляра в поле зрения УИМ, последовательно и многократно совмещали его с крайними пунктирными штрихами окулярной сетки УИМ (расстояние между которыми 1,8 мм) с помощью микрометра оптической линейки. Такой метод позволил определить цену деления микрометра без влияния других составляющих погрешностей оптической линейки, которые возникли бы при определении цены деления отсчетного устройства непосредственно в корпусе этой линейки.

Цену деления c и увеличение V в плоскости биссектора оптической линейки определили по формулам

$$c = \frac{l}{2n}, \quad (4)$$

$$V = \frac{n}{l}, \quad (5)$$

где l — длина между крайними пунктирными штрихами окулярной сетки УИМ, т. е. 1,8 мм;

n — число делений (50) на барабане микрометра, умноженное на число его оборотов (16), соответствующее длине l ;

$2\times$ — увеличение автоколлимационной системы оптической линейки.

Значение цены деления c микрометра было получено равным 1,016 мкм, а увеличение $V = 4,91\times$. Отношение l/n было определено с погрешностью $\pm 0,04$ мм, что при увеличении $4,91\times$ составит $\pm 0,008$ мм.

Продифференцировав формулу (4), нашли погрешность определения цены одного деления микрометра оптической линейки

$$dc' = d\left(\frac{l}{2n}\right) = \frac{1}{2n} dl. \quad (6)$$

Отсюда погрешность $\delta_4 = 0,005$ мкм для $h = 0$. Для $h = 400$ погрешность $\delta_4 = 2$ мкм, т. е. с увеличением отклонений от прямолинейности погрешность δ_4 пропорционально возрастает, что согласуется с экспериментальными данными (рис. 3).

Определенная экспериментально (табл. 1) неисключенная остаточная систематическая погрешность из-за непараллельности оптической оси прибора прямой, соединяющей крайние точки поверяемой поверхности, $\Theta_1 = 0,2$ мкм.

Погрешность Θ_2 , вызываемая разнофокусностью объективов f_1 и f_2 автоколлимационной системы, определена по формуле

$$\Theta_2 = X \left(\frac{f_2}{f_1} - 1 \right), \quad (7)$$

где X — несовпадение визирного штриха с оптической осью автоколлимационной системы, которое в нашем случае равнозначно $h = 400$ мкм, т. е. максимальному отклонению от прямолинейности. Для h_{400} погрешность $\Theta_2 = 0,04$ мкм.

Погрешность Θ_3 от апертуры прибора определена по формуле

$$\Theta_3 = \frac{\lambda}{20A}, \quad (8)$$

где λ — длина световой волны;

A — апертура прибора.

При расположении измерительной каретки в центре линейки $A = 1 : 13$ и при расположении на краях линейки $A = 1 : 28$. Поэтому в первом случае $\Theta_3 = 0,34$ мкм, а во втором $\Theta_3 = 0,7$ мкм. При расчете суммарной погрешности принято $\Theta_3 = 0,5$ мкм.

Погрешность Θ_1 возникает из-за того, что при изменении угла наклона измерительной каретки, вызываемом характером контролируемой поверхности, наконечник касается поверхности разными точками сферы. Эта погрешность обусловлена тем, что ось измерительной каретки постоянно наклонена к линии измерения за счет выступающего наконечника относительно контактных поверхностей роликов.

Погрешность Θ_1 определена по формуле

$$\Theta_1 = b(1 - \cos \alpha) = \frac{b\alpha^2}{2} = \frac{b^2}{2a^2}, \quad (9)$$

где $a = 66$ мм, $b = 78$ мм; при опоре каретки на один из роликов максимальный угол наклона α равен $3'$, и погрешность $\Theta_1 = 0,08$ мкм.

Но когда из положения касания контролируемой поверхности левым роликом каретка наклоняется в противоположную сторону до касания правым роликом (или наоборот), погрешность удваивается, т. е. $\Theta_1 = 0,16$ мкм.

Погрешность от упругой деформации γ_1 , вызываемую измерительным усилием каретки, можно вычислить по формуле Герца. С учетом того, что наконечник в приборе корундовый с радиусом 14 мм и поверяемая поверхность из стали, определена погрешность $\gamma_1 = 0,4$ мкм.

Погрешность γ_1 не оказывает прямого влияния на результат измерения h , так как она исключается методикой измерения. Но постоянный наклон измерительной каретки относительно поверяемой поверхности и смещение центра тяжести каретки (примерно на половину) из-за положения осветителя вызывает увеличение погрешности δ_2 от непостоянства контакта измерительного наконечника с поверяемой поверхностью.

Погрешность γ_2 , вызываемая деформацией оптической линейки из-за температурного градиента, возникает при изменении температурного режима во время измерения. Для исключения этой погрешности при измерении необходимо, чтобы температура на концах оптической линейки различалась не более чем на $0,2$ град.

Другим источником этой погрешности является несоблюдение предварительной выдержки оптической линейки не менее 10—12 ч до начала измерения.

Отклонения температуры от 20° С в пределах ± 4 град и погрешность определения температуры до $0,1$ град не оказывают влияния на показания линейки ИС-36 ввиду малых значений h .

На основании произведенного анализа составляющих погрешностей вычислены суммарные значения квадратической случайной погрешности и значение остаточной систематической погрешности.

Средняя квадратическая случайная погрешность σ прибора определена по формуле

$$\sigma = \pm \sqrt{(\delta_1 \sqrt{2})^2 + (\delta_2 \sqrt{2})^2 + (\delta_3 \sqrt{2})^2 + (\delta_4 \sqrt{2})^2} \quad (10)$$

и равна $\sigma_{h=0} = \pm 0,8$ мкм, $\sigma_{h=100} = \pm 3,0$ мкм.

Остаточные систематические погрешности, которые уже не могут быть исключены, рассмотрены как погрешности случайного характера, и суммарная их погрешность для всех значений h равна

$$\Theta = \pm \sqrt{\Theta_1^2 + \Theta_2^2 + \Theta_3^2 + \Theta_4^2} = \pm 0,56 \text{ мкм.} \quad (11)$$

Отношение $\frac{\Theta}{\sigma_{h=0}} < 2$, что позволяет оценивать исследуемый прибор в основном по его случайной погрешности, характеризуемой средней квадратической погрешностью, равной $\pm 0,8$ мкм. При том же значении вероятности 0,95, которое было принято для экспериментальной формулы

(3), и положив, что $\sigma t \approx 1,6$ (при $t = 1,96$), можем записать следующую теоретическую формулу для определения погрешности линейки ИС-36:

$$\Delta_{\text{теор}} = \pm (1,6 + 5 \cdot 10^{-3}h) \text{ мкм}, \quad (12)$$

где h — измеряемое отклонение от прямолинейности.

Как показал анализ составляющих погрешностей, с увеличением h увеличивается случайная погрешность от накопления погрешности определения цены деления отсчетного устройства. Погрешность, определенная по экспериментальной формуле (3), не превосходит погрешностей, найденных по формуле (12).

На величину первого члена формулы (12) наибольшее влияние оказала погрешность δ_2 от нестабильности контакта наконечника, обусловленная большой массой измерительной каретки (1,4 кг) и смещением центра тяжести ее из-за односторонней перегрузки кожухом осветителя. Погрешность прибора может быть снижена, если уменьшить массу каретки и изменить конструкцию осветителя.

При графическом методе с применением регистрирующего устройства погрешность линейки ИС-36 увеличивается за счет погрешности, вызываемой неточностью наколов на миллиметровой бумаге. Опыты показали, что разброс наколов в вертикальном направлении составил 2,5 мм при увеличении $1000\times$, что соответствует 2,5 мкм.

Для графического метода при доверительной вероятности 0,95 формула погрешности оптической линейки будет

$$\Delta_{\text{теор-граф}} = \pm (2,8 + 5 \cdot 10^{-3}h) \text{ мкм} \quad (13)$$

и для $h = 400$ мкм

$$\Delta_{\text{теор-граф}} = \pm 4,8 \text{ мкм}.$$

Оптическая линейка может быть применена при контроле доведенных, шлифованных и шаброванных поверхностей, допустимые отклонения которых от прямолинейности и плоскостности лежат в пределах $\pm 0,004 + 0,4$ мкм (при методе непосредственной оценки) или в пределах $\pm 0,006 + 0,05$ мкм (при графическом методе), а именно:

а) поверочных линеек (ГОСТ 8026—64) типов: ЛЧ—длиной 500 мм, класса I; ШП — длиной 400 мм, класса 1, 2; ШП, ШД, ШМ — длиной от 630 мм всех классов точности;

б) поверочных и разметочных плит (ГОСТ 10905—64) всех классов точности и типоразмеров;

в) плоских и цилиндрических поверхностей направляющих станков, приборов, образующих валов (ГОСТ 10356—63):

длиной от 300 до 400 мм, степеней точности III—X	
» свыше 400 до 1000 мм »	» II—X
» » 1000 мм »	» I—X

По сравнению с другими приборами для определения отклонений от прямолинейности оптическая линейка ИС-36 имеет ряд преимуществ: большие пределы измерения отклонений от прямолинейности, простота конструкции, сравнительно простая методика измерения. Наличие экрана в приборе облегчает работу и увеличивает производительность труда. Линейка ИС-36 мало чувствительна к тряске и вибрациям, ее показания даны в линейной, а не в угловой мере, что находится в соответствии с ГОСТ 10356—63, 8026—64 и 10905—64.

Некоторые конструктивные недостатки линейки ИС-36 (невозможность измерять отклонения от прямолинейности в горизонтальной плоскости, затруднение контроля цилиндрических поверхностей из-за отсутствия специальных опор, большая масса корпуса прибора и каретки) могут быть устранены при усовершенствовании модели корпуса.

Поступила в редакцию 17/1 1967 г.

**О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ ИЗМЕРЕНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС
И ПОВЕРКИ ЗУБОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

В настоящее время в связи с возросшими требованиями к точности изготовления и контроля зубчатых передач возникла необходимость повысить точность, производительность и надежность зубоизмерительной аппаратуры.

Наряду с совершенствованием известных методов и средств контроля зубчатых зацеплений в СССР и за рубежом разрабатываются новые методы измерения и зубоизмерительное оборудование.

Наиболее интенсивно в последние годы разрабатываются приборы для комплексного однопрофильного контроля зубчатых колес, позволяющие максимально приблизить условия контроля к условиям эксплуатации колес, а также выявить погрешности их элементов [1]. Однако высокая стоимость этих приборов и сложность достижения необходимой точности измерения ограничивают их применение при контроле зубчатых колес и передач наиболее высокой точности.

В связи с этим в настоящее время широко используют поэлементные методы контроля для оценки эксплуатационных свойств зубчатых колес, правильности технологического процесса их изготовления, а также точности зубоизмерительного оборудования, инструмента и др. У колес проверяют такие параметры, которые определяют правильность работы зацепления, а именно: окружной и основной шаг, профиль зуба, радиальное биение зубчатого венца, толщину и направление зубьев. Почти все эти элементы можно контролировать на имеющемся зубоизмерительном оборудовании известными методами.

Наиболее трудным по точности изготовления и измерения является эвольвентный профиль зуба. В ГОСТ 1643—56 указаны весьма жесткие допуски на отклонения этого профиля. Например, для зубчатых колес 3-й степени точности диаметром 50—320 мм допуск составляет 2,5÷4,8 мкм.

Следует отметить, что в первую очередь проверяют форму профиля зуба, так как она влияет на результаты измерения других параметров. Форма профиля и расположение зубьев по окружности зубчатого венца и их погрешности влияют на плавность передачи вращения, изменение передаточного отношения, а также на прочность и износ зубчатой передачи [2].

Профиль зубчатых колес с эвольвентным зацеплением контролируют в основном на эвольвентомерах. Другие приборы и методы (проекционные приборы, метод слепков и др.) не обеспечивают необходимой точности, поэтому их применяют только в тех случаях, когда невозможно использовать

эвольвентомеры. На практике применяют эвольвентомеры различных типов, однако даже наиболее точные из них не обеспечивают выполнения требований ГОСТ 1643—56 к профилю зубчатых колес 3-й степени точности. В значительной мере это объясняется сравнительно большими погрешностями поверки самих приборов [3].

Наиболее перспективной и принципиально более правильной является поверка эвольвентомеров по образцовому эвольвентному кулаку. Однако сложность изготовления и аттестации кулаков с требуемой точностью ограничивает в известной мере использование этого метода в промышленности.

В настоящее время можно рекомендовать для точных и ответственных измерений эвольвентного профиля зубчатых колес универсальные и индивидуально-дисковые эвольвентомеры (табл. 2).

На основании исследований для этих приборов была определена средняя квадратическая погрешность как функция основного параметра зубчатого колеса — угла развернутости:

$$\sigma_{\varphi} = 0,7 + 0,08\varphi.$$

Что касается остальных параметров колеса, то контроль большинства из них менее труден, так как запас точности применяемого зубоизмерительного оборудования позволяет выполнить требования, предъявляемые к ним стандартами. Могут быть использованы при этом универсальные зубоизмерительные приборы типа БВ-584М, фирмы «Цейс» и др.

Как уже указывалось выше, до сих пор не удавалось достичь необходимой точности контроля профиля зуба эвольвентных зубчатых колес. Даже наиболее точные приборы не позволяют контролировать профили с погрешностью менее 2—3 мкм, поэтому выполнение требований ГОСТ 1643—56 и ГОСТ 6512—58 представляют задачу чрезвычайно сложную. Такие измерения весьма трудоемки и недостаточно надежны даже при строгом соблюдении всех условий измерений.

В результате проведенных в ХГНИИМ исследований повышена точность поверки эвольвентомеров в 2—3 раза и снижена погрешность измерений профиля до 1 мкм [4].

При измерении интерференционным методом в полярной системе координат действительные значения радиуса-вектора дискретных точек эвольвенты сравнивают с расчетными. Воспроизводят эвольвенту по отдельным фиксированным ее точкам. При этом каждому угловому перемещению эвольвенты $\Delta\varphi$ соответствует определенное изменение ее радиуса кривизны $\Delta\rho$:

$$\Delta\rho = r_0 \Delta\varphi,$$

где r_0 — радиус основной окружности эвольвенты.

Воспроизведение эвольвенты в полярной системе координат обеспечивает единообразие и правильность передачи формы кривой благодаря использованию образцовых концевых мер длины и образцовых многогранников.

Сочетание указанных измерительных средств в высшем звене поверочной схемы, как показали расчеты, дает возможность воспроизводить эвольвенту с погрешностью, не превышающей 0,8—1 мкм. Эти же образцовые меры служат и для поверки лежащих на ступень ниже образцового многогранника с предельной погрешностью $\delta_{\text{пр}} = \pm 1,5''$ и образцовых концевых мер 3-го разряда с $\delta_{\text{пр}} = \pm (0,1 + 2 \cdot 10^{-2}L)$ мкм, по которым в свою очередь поверяют образцовые приборы более низкой точности.

В поверочных схемах указываются методы поверки приборов, служащих для контроля измерительных колес и червяков. Хотя государственные стандарты распространяются только на цилиндрические и измерительные

Отношения между погрешностями измерений элементов цилиндрических зубчатых колес и допустимыми отклонениями, %

Таблица 1

Поверхностные элементы	Степени точности колес								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кинематическая погрешность ΔF_z	48	31	33,5	25	—	—	—	—	—
Циклическая погрешность ΔF	40	25	16,1	20	—	—	—	—	—
Накопленная погрешность ΔI_z	51	31	21	37	26	16	—	—	—
Радиальное биение E_0	51	30	20	35	21	13	9	5	3
Колебание длины общей нормали $\Delta_0 L$	45	28	20	28	17	11	6	—	—
Погрешность обката $\Delta \varphi_z$	50	30	18	24	—	—	—	—	—
Погрешность профиля Δf	50	31	21	40	25	16	—	—	—
Отклонение основного шага Δt_0	48	31	25	31	20	12	8	—	—
Колебание окружного шага Δt	—	—	—	—	25	15	9	5	4
Колебание межосевого расстояния на обороте Δ_{0a}	—	—	22	27	17	11	6	—	—
То же, на зубе Δ_{0a}	—	—	36	23	25	23	11	—	—
Погрешность формы и расположения контактной линии Δb_0	48	38	32	37	32	24	—	—	—
Непрямолнейность контактной линии Δb_n	52	40	28	35	27	23	16	—	—
Погрешность направления зуба ΔB_0	52	40	33	37	30	24	19	14	12
Отклонение осевого шага ΔB_z	44	33	27	22	17	13	14	—	—
Смещение исходного контура Δh	43	36	31	42	32	18	12	7	4
Среднее	48	32	26	31	24	17	11	8	6
Отношение погрешности измерения к допуску	1/2	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	1/10	1/10

колеса, в поверочные схемы включены и образцовые конические колеса и червяки, по которым поверяют шестерни и червячные колеса, а также приборы, применяемые для массового контроля продукции. Для каждого вида измерительных средств приведены предельные допустимые погрешности измерений.

Следует стремиться по возможности приблизить условия поверки зубоизмерительных приборов к условиям их эксплуатации. При такой поверке выявляются погрешности, которые имеют место при контроле зубчатых колес [5]. Поэтому в последнее время наметилась тенденция — поверять указанные приборы с помощью образцовых измерительных зубчатых колес и образцовых эвольвентных кулаков. Это нашло отражение в нормативных документах по поверке зубоизмерительных приборов (инструкциях, методических указаниях).

Таблица 2

Приборы, рекомендуемые для измерения параметров зубчатых колес
(ГОСТ 1843—56)

Приборы	Измеряемые параметры	Степень точности колес
Цилиндрические колеса		
Для контроля кинематической погрешности типов БВ-608М, БВ-979, БВ-936	Кинематическая погрешность	3—6
Универсальные измерительные типов БВ-584К, УЗП-400 и фирм «Цейс», «Иллинойс»	То же	3—9
Шагомеры для окружного шага типов БВ-890 и БВ-891	Разность соседних окружных шагов	6—9
Полуавтоматические для контроля накопленной погрешности	Накопленная погрешность по полуокружности	6—9
Биеннемеры типов Б-2 и Б-10	Радиальное биение	4—11
Рычажно-зубчатые микрометры	Длина общей нормали	4—6
Нормалемеры типов М3 и 756	Длина общей нормали	5—9
Межцентромеры типа КДП-400	Межцентровое расстояние	6—11
Шагомеры для основного шага типов БВ-1080 и БВ-1081	Основной шаг	6—11
Эвольвентомеры фирм «Цейс», «Оркут», «Винко», «Мичиган», «Феллоу» и типов БВ-1089 и КЭУ	Погрешность профиля	3—11
Контактомеры универсальные и ходомеры типов БВ-1060, БВ-973, БВ-5859 и фирмы «Мичиган»	Направление контактных линий	3—8
Контактомеры прямолинейности типов БВ-973 и БВ-1060	Прямолинейность контактной линии	3—9
Тангенциальные зубомеры типов 1КТ, 2КТ и 3КТ	Смещение исходного контура	3—11
Зубчатые колеса		
Универсальные зубоизмерительные типов БВ-584К, ЦВП-400 и фирм «Цейс», «Иллинойс»	Окружной шаг и биение	5—9
Для поверки шага и биения типа БВ-754	Окружной шаг и биение	6—9
Шагомеры для контроля накопленной погрешности окружного шага типа 17750	Накопленная погрешность окружного шага по полуокружности	6—9
Штангензубомеры № 1 и 2	Толщина зуба	7—9
Червячные колеса и червяки		
Универсальные зубоизмерительные типа БВ-584М и фирм «Цейс», «Иллинойс»	Окружной шаг и биение	3—6
Универсальные измерительные микроскопы типа УИМ-21	Профиль червяка, осевой шаг, толщина витка	5—9
Инструментальные микроскопы	То же	5—9
Штангензубомеры № 1 и 2	Толщина витка	6—9

При разработке поверочных схем была проанализирована степень соответствия точности существующего оборудования требованиям нормативных документов на зубчатые передачи. Определены соотношения между погрешностями измерения отдельных элементов зубчатых колес и установленными в стандарте допустимыми отклонениями.

Полученные данные приведены в табл. 1, из которой видно, что наибольшие трудности возникают при контроле колес 3-й степени точности. В этом случае значительная погрешность измерения не позволяет получить отношение погрешности измерения к допуску, в среднем меньшее 1/2. Необходимо повысить точность измерения отдельных элементов зубчатых колес, предварительно разработав новые методы и средства поверки.

В табл. 2 указаны зубоизмерительные приборы и рекомендации к применению их для контроля зубчатых колес различной степени точности, что может быть полезным при оснащении измерительных лабораторий заводов зубоизмерительным оборудованием.

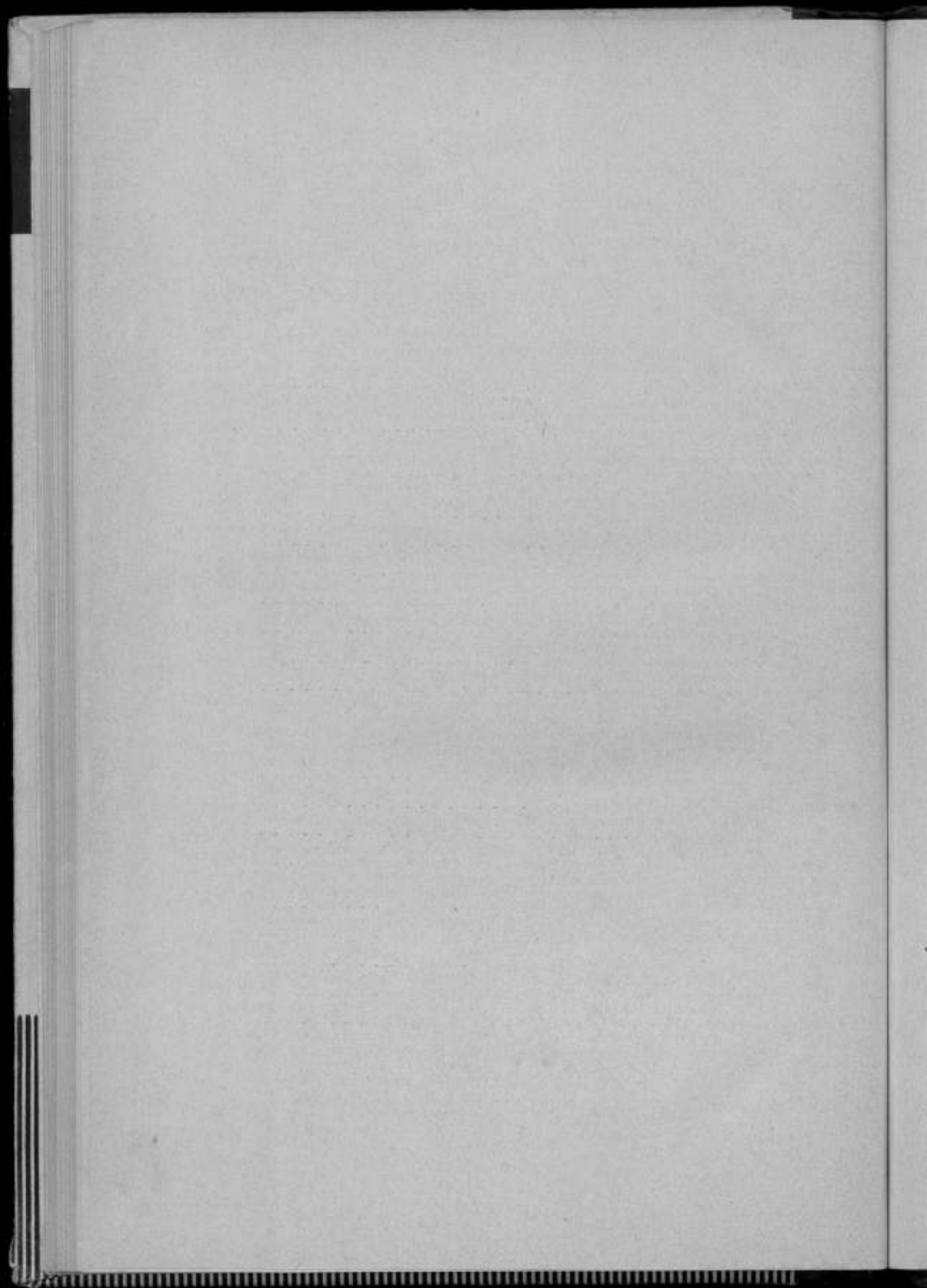
ЛИТЕРАТУРА

1. Марков Н. Н. Зубоизмерительные приборы. «Машиностроение», М., 1965.
2. Ружичка В. Контроль зубчатых колес. Машгиз, М., 1960.
3. Слимкин Г. С. и Гафанович Г. Я. Исследование точности эвольвентомеров. «Измерительная техника», 1961, № 6.
4. Гафанович Г. Я. Интерференционный метод контроля эвольвентных кулаков. «Измерительная техника», 1965, № 1.
5. Тайц Б. А. и Марков Н. Н. Нормы точности и контроля зубчатых колес. Стандартгиз, М., 1960.

Поступила в редакцию 15/II 1967 г.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
М. Л. Бржезинский, Т. В. Колымагина, Г. М. Марголина, Г. В. Симахина. Эталонная интерференционная установка для воспроизведения единиц длины и результаты ее исследования	5
Н. Р. Батарчукова, Л. А. Ирикова, А. И. Карташев. Спектроинтерферометрическая установка для измерения длин волн и исследования контуров спектральных линий	19
Ю. П. Ефремов. Исследование интерференционной установки ВНИИМ для измерения длины образцовых плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда и геодезических жезлов длиной до 1200 мм	28
Ц. И. Глоzman, Е. А. Птицына. Исследование условий воспроизведения контура зеленой линии ртути-198	37
Ю. П. Ефремов, Н. А. Калинин. Стабилизация гелий-неоновых лазеров и применение их для интерференционных измерений длины	41
Н. В. Трофимова. Интерферометры с плоскими зеркалами для счета интерференционных полос	48
Л. К. Каяк, Н. В. Тришин, О. В. Ячменцев. Автоматический фотоэлектрический продольный компаратор	63
Д. И. Зорин, Ю. Н. Шестопалов. Фотоэлектронные измерительные системы к двухлучевым интерферометрам	69
Н. В. Тришин. О погрешностях измерений штриховых мер двойным фотоэлектрическим микроскопом	77
Н. В. Трофимова. Интерферометры повышенной чувствительности	86
Ю. П. Ефремов, Е. И. Латышева, Е. Е. Шарова, О. Ю. Шошина. Измерение линейных и угловых размеров кубов из плавленого кварца	93
М. Г. Богуславский, В. М. Элиашберг. О применении моделирующих установок для учета динамических погрешностей некоторых измерительных приборов	100
Л. С. Бабаджанов. Влияние контактных деформаций от измерительного наконечника на точность измерений	110
Ю. С. Миронов. О поверке в динамическом режиме приборов для контроля линейных размеров	115
А. И. Карташев, К. С. Ошанина. Исследование разрешающей способности проекционной оптической системы с вибрирующим экраном	124
А. Н. Королев. Использование оптической системы с фазовой модуляцией в качестве индикатора установки штриха при линейных и угловых измерениях	129
А. В. Котков. О поверке радио- и светодальномеров	132
И. В. Лукин, С. В. Сикора, Г. С. Симкин. Применение радиоинтерферометра для измерения длины	136
А. Д. Рубинов. Новый прибор для измерения наружных диаметров крупногабаритных изделий методом описывания	140
А. Н. Амагунн, Е. Б. Шевченко. Установка для исследования теплового расширения твердых тел при низких температурах	146
Е. П. Адексеева, М. Г. Богуславский, Т. И. Калинин. Исследование оптической линейки ИС-36	153
Г. Я. Гафанович, Г. С. Симкин. О некоторых вопросах измерения элементов зубчатых колес и поверки зубоизмерительного оборудования	162



РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В СБОРНИКЕ

УДК 531.711 : 531. 715. 1.

Эталонная интерференционная установка для воспроизведения единицы длины и результаты ее исследования

*М. Л. Бржезинский, Т. В. Колымагина,
Г. М. Марголина, Г. В. Симахина*

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 5—18.

В статье рассмотрены функциональные схемы эталонной интерференционной установки, исследована входящая в нее аппаратура. Приведены результаты воспроизведения метра и дециметровых подразделений в длинах волн первичного эталонного излучения ^{86}Kr и вторичных длин волн ^{198}Hg . Дан анализ погрешностей.

Таблиц 5, иллюстраций 7, библиографий 6.

УДК 531.715.1

Спектроинтерферометрическая установка для измерения длин волн и исследования контуров спектральных линий

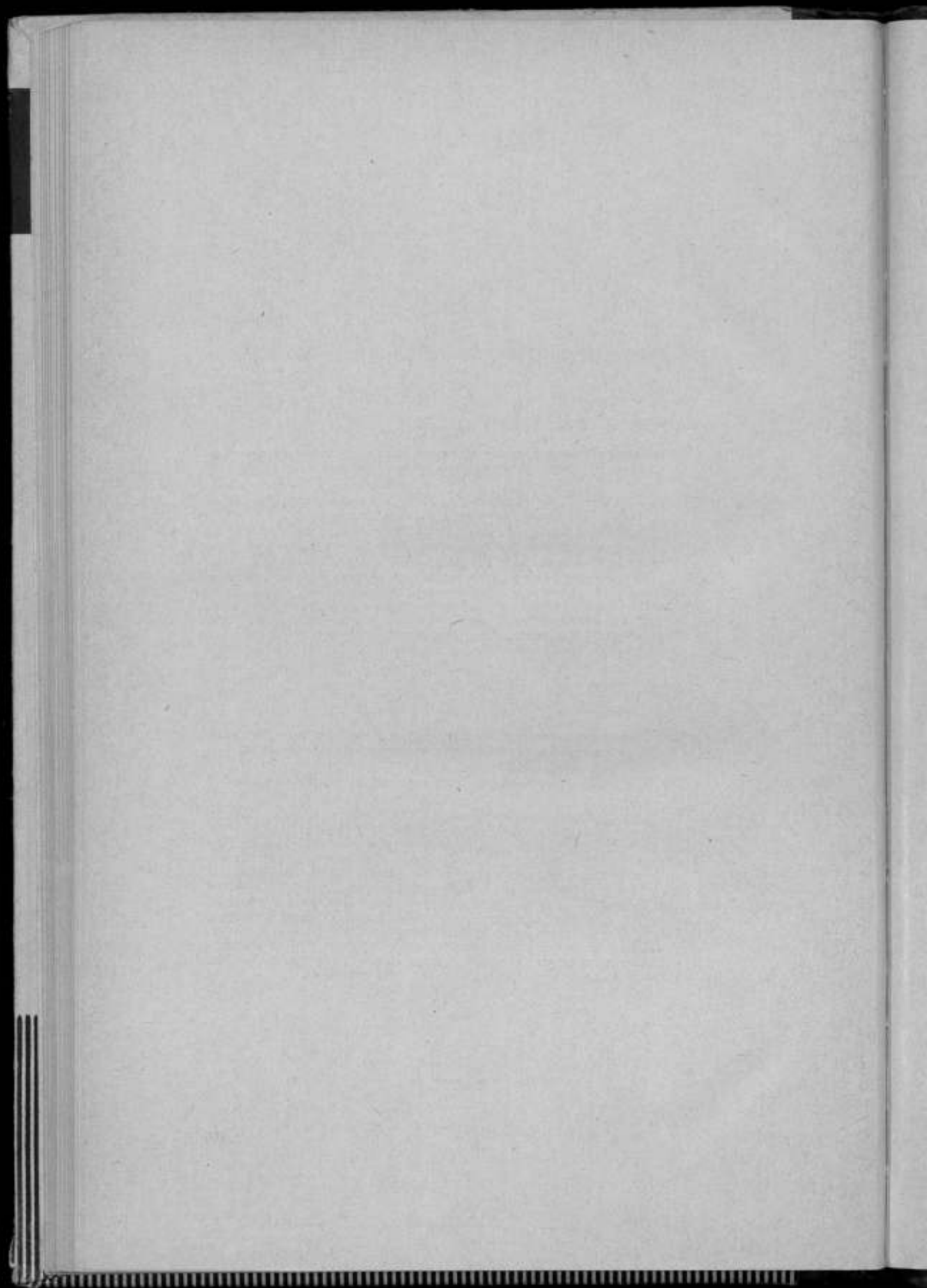
Н. Р. Батарчукова, Л. А. Ирикова, А. И. Каршаев

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 19—27.

Описаны принцип действия и конструкция спектроинтерферометра для исследования эталонных монохроматических излучений. Показано, что с помощью спектроинтерферометра можно определить значения длин волн монохроматических источников с погрешностью $(0,5 \div 1) \cdot 10^{-8}$ для видимой, близкой инфракрасной и ультрафиолетовой областей спектра. Изучение записей контуров спектральных линий позволяет судить о метрологических характеристиках исследуемых источников.

Приведенные результаты исследования показывают, что спектроинтерферометр может быть использован кроме эталонных работ для решения широкого круга задач точной спектроскопии.

Таблиц 1, иллюстраций 9, библиографий 3.



УДК 531.711: 531.715

Исследование интерференционной установки ВНИИМ для измерения длины образцовых плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда и геодезических жезлов длиной до 1200 мм

Ю. П. Ефремов

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 28—36.

Описана установка с горизонтальным интерферометром ВНИИМ для измерения длины концевых мер до 1200 мм. Приведены результаты исследования. Установлено, что средняя квадратическая погрешность измерения мер длиной 1 м лежит в пределах 0,08—0,11 мкм, в зависимости от условий измерения. Приведены результаты сличения исследуемой установки с образцовой установкой ВНИИМ для измерения мер до 100 мм.

Таблиц 5, иллюстраций 5, библиографий 6.

УДК 531.715

Исследование условий воспроизведения контура зеленой линии ртути-198

Ц. И. Глазман, Е. А. Птицына

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 37—40.

Приведены результаты исследования полуширины и симметрии контура, а также смещения максимума контура зеленой линии ртути-198 в зависимости от температуры стенок лампы.

Показано, что наилучший интервал температур, при которых работает источник, 12—20° С.

Иллюстраций 4, библиографий 5.

УДК 621.375.8: 531.715.1

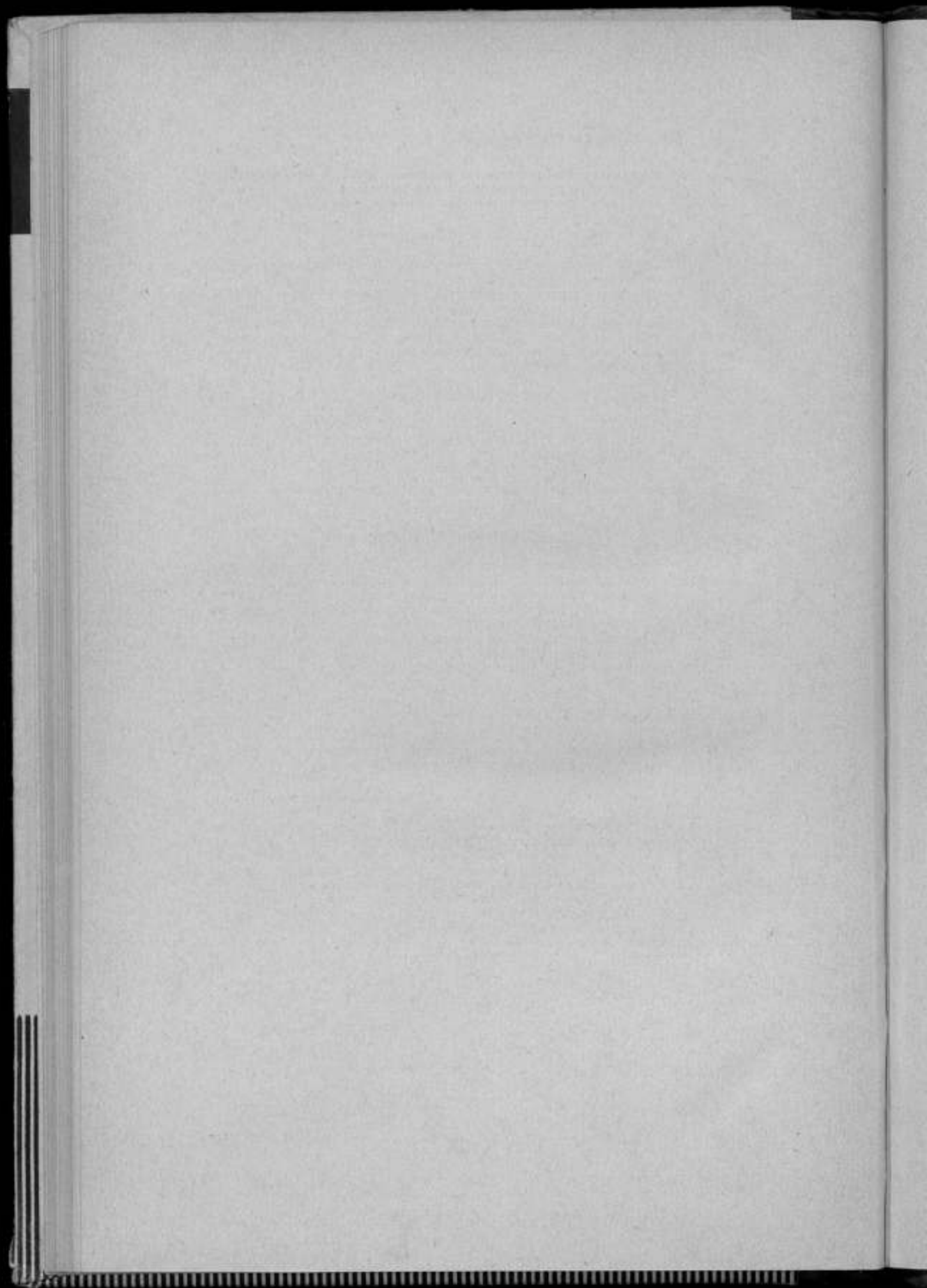
Стабилизация гелий-неоновых лазеров и применение их для интерференционных измерений длины

Ю. П. Ефремов, Н. А. Калинин

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г. стр. 41—47.

Рассмотрены условия, необходимые для применения лазеров в качестве источников света при интерференционных измерениях длины. Приведена схема стабилизации газовых лазеров, работающих в режиме генерации одной частоты. Приведены результаты сравнения длины волны 0,633 мкм с длиной волны 0,546 мкм зеленой линии ртути-198, а также результаты измерения длины концевых мер от 125 до 1000 мм с помощью стабилизированного лазера.

Таблиц 2, иллюстраций 6, библиографий 10.



УДК 531.715.1

Интерферометры с плоскими зеркалами для счета интерференционных полос

Н. В. Трофимова

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 48—62.

Кратко описаны два интерферометра с плоскими зеркалами — для измерения малых (линейных) перемещений каретки инструментального микроскопа и для измерения длины шкал до 200 мм счетом интерференционных полос.

Рассмотрены условия, при которых может быть осуществлен реверсивный счет интерференционных полос в интерферометре с плоскими зеркалами. Приведены результаты измерений шкал ВНИИМ в свете гелий-неонового лазера.

Иллюстраций 7, таблица 1, библиографий 7.

УДК 531.711.1: 535.822-52

Автоматический фотоэлектрический продольный компаратор

Л. К. Каяк, Н. В. Тришин, О. В. Ячменцев

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 63—68.

Описан автоматический продольный компаратор ВНИИМ с двойным микроскопом для поверки подразделений штриховых мер. Особенностью оптической схемы двойного фотоэлектрического микроскопа является то, что она позволяет изменять расстояние между объективами без изменения увеличения микроскопа.

Рассмотрен принцип работы электронного автоматического измерительного устройства, в котором результаты измерений выдаются на цифровое табло или печатающее устройство.

Приведены результаты предварительного экспериментального исследования автоматического фотоэлектрического компаратора.

Иллюстраций 3, библиографий 2.

УДК 531. > 15.1: 535.825

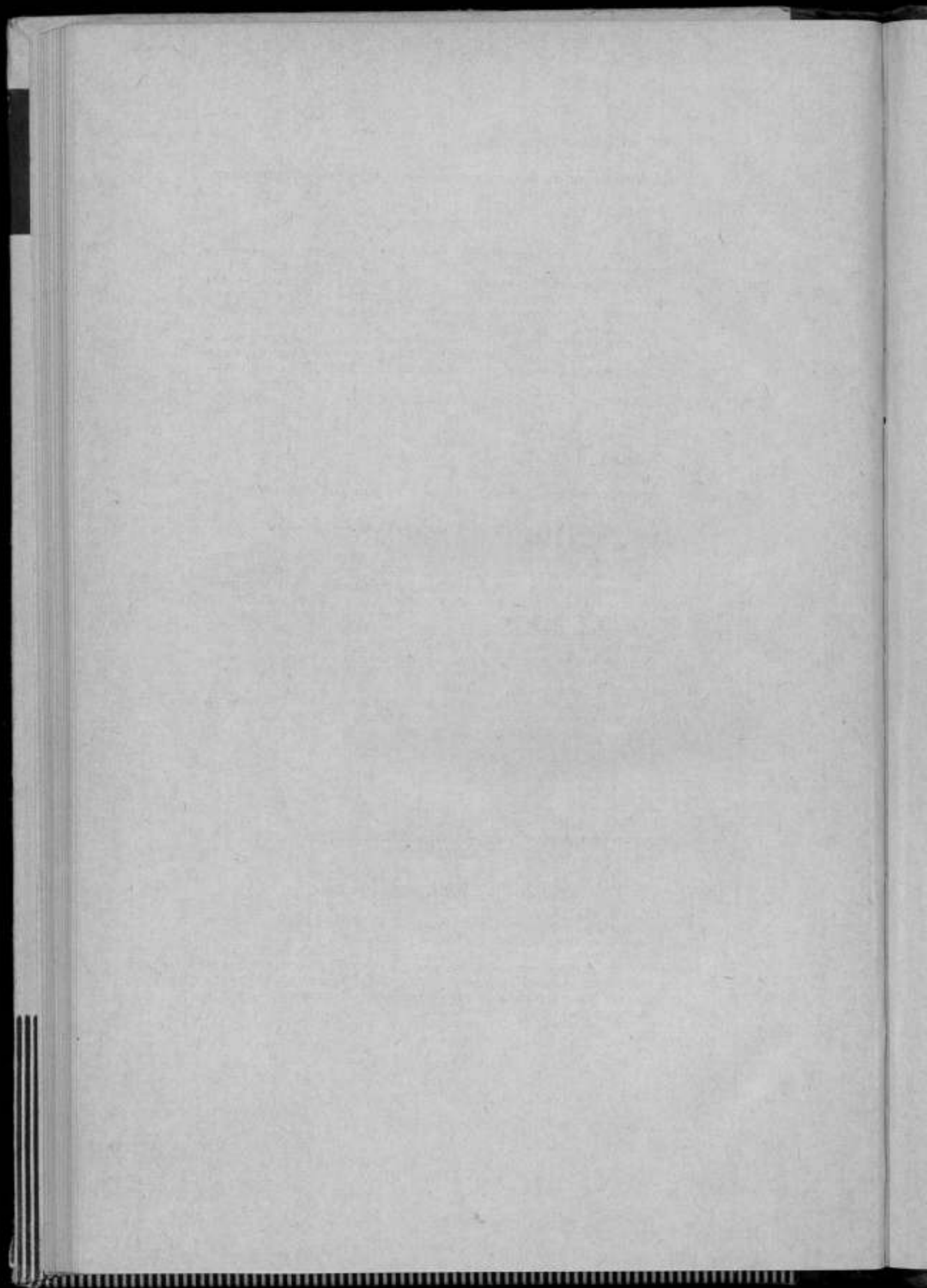
Фотоэлектронные измерительные системы к двухлучевым интерферометрам

Д. И. Зорин, Ю. Н. Шестопалов

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 69—76.

Рассмотрены различные принципы построения фотоэлектронных систем к двухлучевым интерферометрам, дан анализ их метрологических характеристик, а также указаны пути совершенствования и особенности применения этих систем при интерференционных измерениях.

Иллюстраций 7, библиографий 9.



УДК 531.711.1.088: 535.822.082.52

О погрешностях измерений штриховых мер двойным фотоэлектрическим микроскопом

Н. В. Тришин

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 77—85.

Проведен анализ погрешностей измерений разностей длин на двойном фотоэлектрическом микроскопе. На основании анализа оценена точность регулировки равенства амплитуд колебаний изображений штрихов и оптически увеличений каналов микроскопа, при которой погрешность измерений не превышала заданного значения. Рассмотрено влияние шумов фотопреобразователей и электронной измерительной схемы на точность измерений.

Даны рекомендации по настройке двойного фотоэлектрического микроскопа, при которых погрешность сравнения штриховых мер не будет превышать 0,1 мкм.

Таблиц 3, иллюстраций 3, библиографий 3.

УДК 531.715.1

Интерферометры повышенной чувствительности

Н. В. Трофимова

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 86—92.

Описаны оптические схемы интерферометров с подвижными зеркалами, в которых повышенная чувствительность к перемещениям достигается с помощью многократных отражений пучка ветви подвижного зеркала или дополнительного прохождения пучка через систему интерферометра.

Рассмотрены некоторые свойства интерферометров повышенной чувствительности и перспективы применения их со счетом интерференционных полос.

Иллюстраций 4, библиографий 8.

УДК 531.732: 666.19

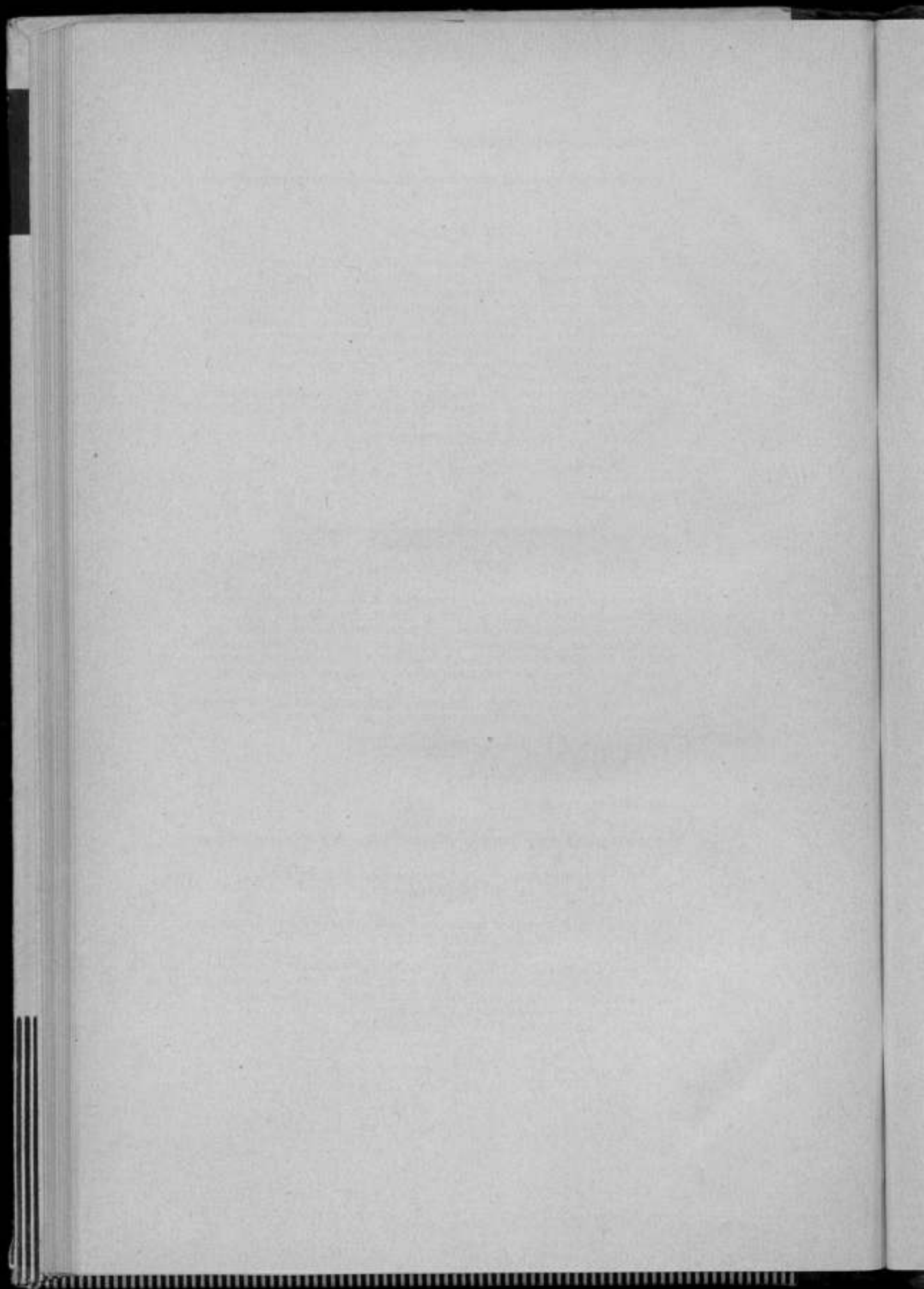
Измерение линейных и угловых размеров кубов из плавленого кварца

*Ю. П. Ефремов, Е. И. Латышева, Е. Е. Шарова,
О. Ю. Шошина*

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 93—99.

Приведены результаты измерения линейных размеров двух кварцевых кубов с длиной ребер 72 и 100 мкм на интерферометре Кестерса, специально оборудованном для этой цели. Даны также результаты измерений центральных углов между соседними гранями этих кубов на эталонной автоколлимационной установке ВНИИМ.

Таблиц 4, иллюстраций 1, библиографий 8.



УДК 621.317.7.001.5.088 681.142.334

О применении моделирующих установок для учета динамических погрешностей некоторых измерительных приборов

М. Г. Богуславский, В. М. Элиашберг

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 100—109.

Рассмотрены возможности использования электронных моделирующих установок для расчета динамических погрешностей измерительных приборов, свойства которых с достаточной степенью точности могут быть описаны как свойства динамических систем с сосредоточенными параметрами.

Основное внимание уделено особенностям моделирования динамических элементов, наиболее часто встречающихся в приборах для контроля линейных размеров в производственных условиях.

Иллюстраций 11.

УДК 531.714.2.088.22

Влияние контактных деформаций от измерительного наконечника на точность измерений

Л. С. Бабаджанов

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 110—114.

На точность измерений длин приборами с ценой деления шкалы менее 0,0001 мм наряду с другими факторами влияют измерительное усилие и его колебание, вызывающие деформации в зоне контакта измерительного наконечника с измеряемой деталью. Рассмотрены контактные деформации в зависимости от измерительного усилия для различных материалов измеряемой детали и радиусов сферы измерительного наконечника. Погрешности от контактной деформации для приборов с ценой деления шкалы менее 0,0001 мм в некоторых случаях могут быть соизмеримы с ценой деления шкалы прибора.

Показан способ учета контактных деформаций при измерениях линейных размеров. Рассмотрены методы и средства для определения измерительного усилия, которыми пользуются в поверочной практике, и указаны их недостатки.

Таблиц 1, иллюстраций 2, библиографий 4.

УДК 531.71.089.6

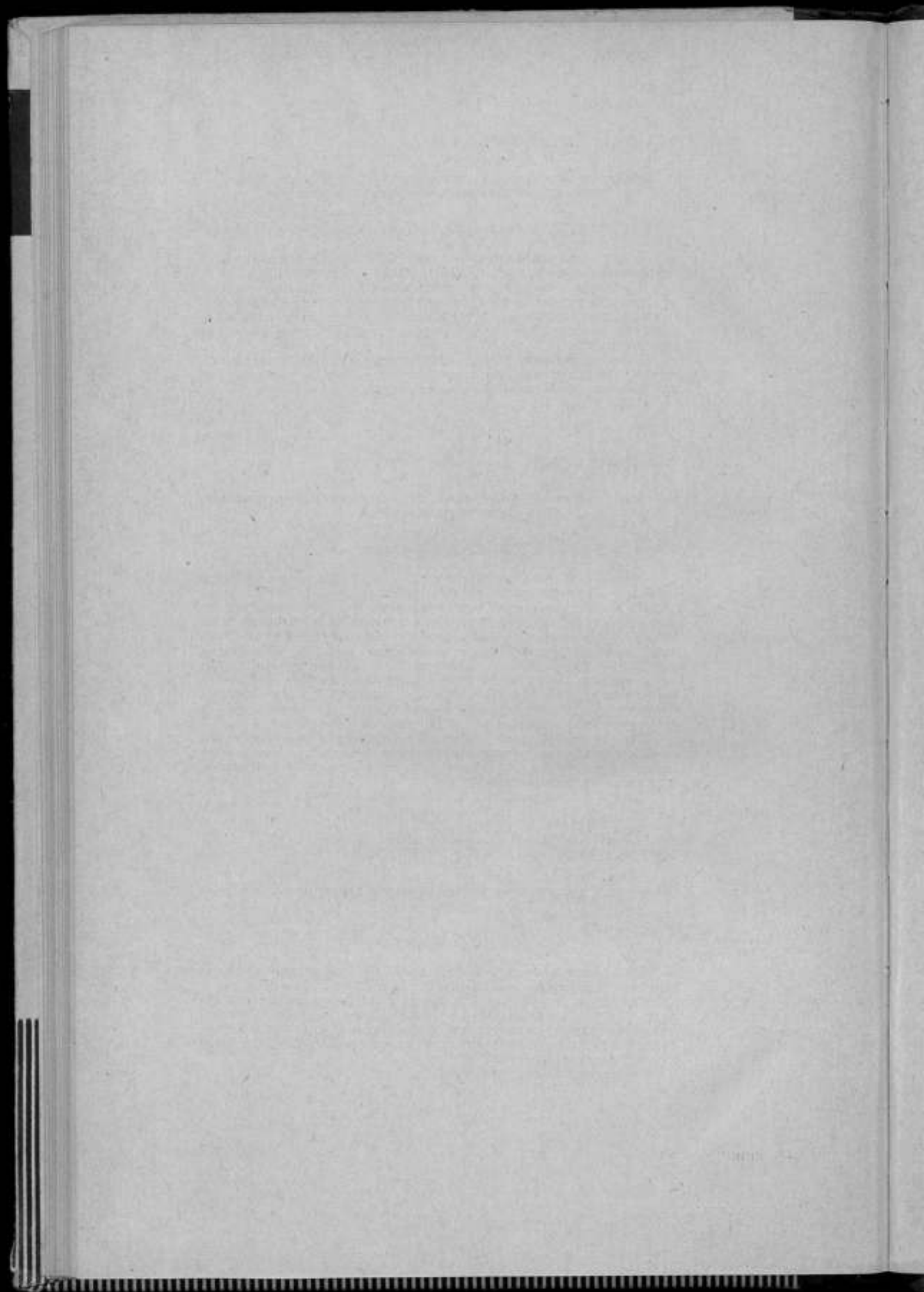
О проверке в динамическом режиме приборов для контроля линейных размеров

Ю. С. Миронов

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 115—123.

Рассмотрен вопрос о необходимости проверки в динамическом режиме приборов для контроля линейных размеров. Для анализа различных определений погрешности приборов в динамическом режиме и предложены оптимальная схема и методика проверки, а также дополнительная поверочная схема для этих приборов.

Иллюстраций 5, библиографий 16.



УДК 531.715

Исследование разрешающей способности проекционной оптической системы с вибрирующим экраном

А. И. Карташев, К. С. Ошанина

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 124—128.

Приведены результаты исследования разрешающей способности проекционной оптической системы с применением вибрирующего матового экрана в плоскости изображения.

Исследованию подвергались несколько типов стеклянных экранов. Работа проводилась на экспериментальной лабораторной установке ВНИИМ.

Оценка качества изображения мира показала, что вибрация экрана в плоскости изображения может значительно повлиять на разрешающую способность проекционной оптической системы.

Таблиц 1, иллюстраций 4, библиографий 4.

УДК 531.715.27; 531.74; 535.8

Использование оптической системы с фазовой модуляцией в качестве индикатора установки штриха при линейных и угловых измерениях

А. Н. Королев

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 129—131.

Описана исследованная во ВНИИМ оптическая система с фазовой модуляцией, которая была использована в качестве индикатора установки штриха при линейных и угловых измерениях. Источником информации о перемещении штриха (щели) служили ахроматические полосы переналожения. Общее увеличение системы составляло около $1000\times$. Средняя квадратическая погрешность установки штриха $\pm 0,1$ мкм. Приведены оптимальные геометрические параметры использованной системы.

Иллюстраций 2, библиографий 2.

УДК 621.396.967.27.089.6
531.719.24.089.6

О поверке радио- и светодальномеров

А. В. Котков

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 132—135.

Приведены сведения о современных радио- и светодальномерах, а также дан анализ точности измерения длины электронными методами.

Рассмотрены современные методы и основные источники погрешностей определения коэффициента преломления атмосферы.

Исследованы возможности повышения точности и обеспечения единства линейных измерений с помощью радио- и светодальномеров.

Библиографий 3.

УДК 621.317.762; 531.711

Применение радиointерферометра для измерения длины

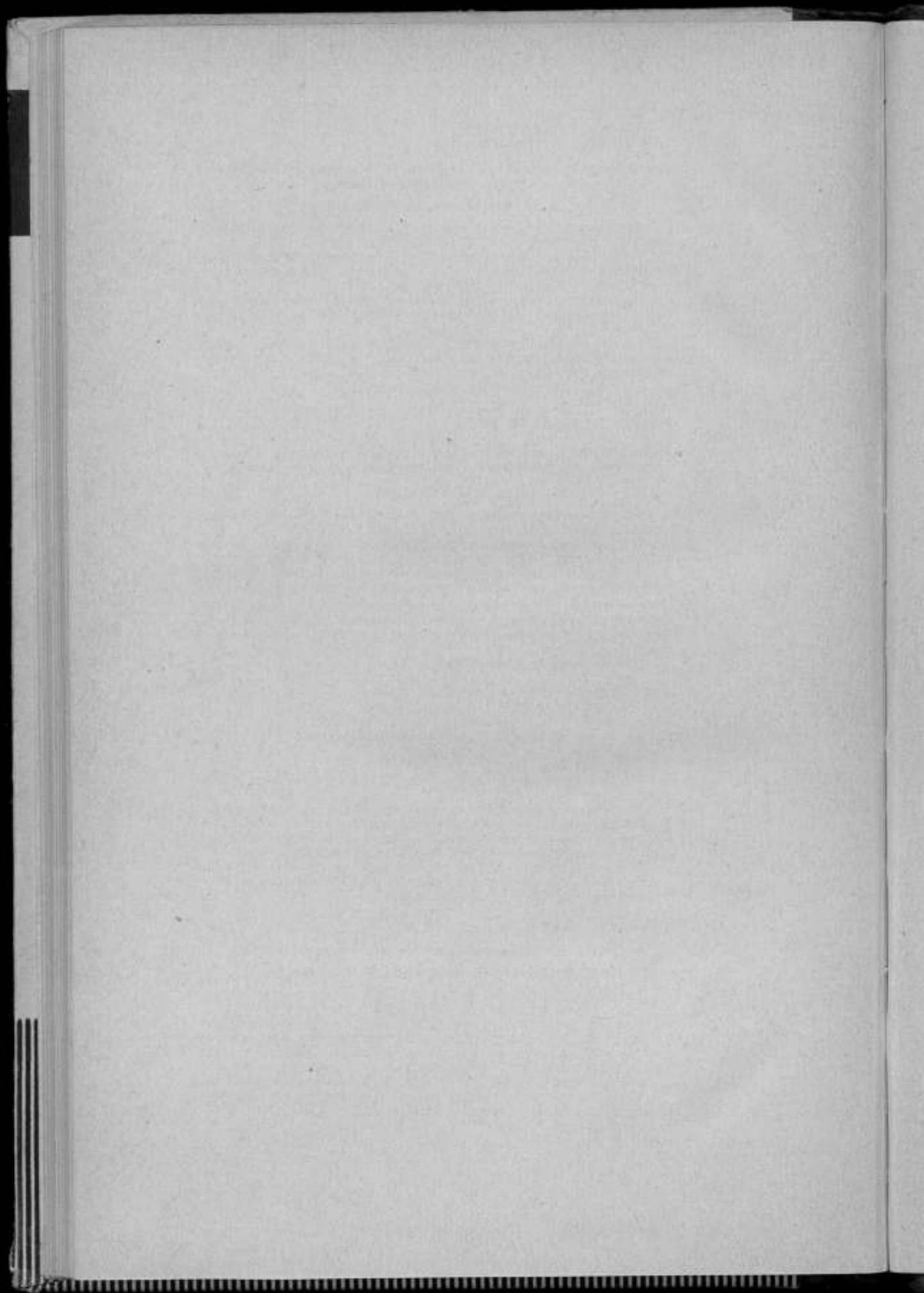
И. В. Лукин, С. В. Сикора, Г. С. Симкин

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 136—139.

Изложены принципы, положенные в основу создания радиointерферометра. Описана конструкция радиointерферометра, предназначенного для поверки штриховых и концевых мер длины. Средняя квадратическая погрешность при измерении 12-метровой геодезической проволоки составляла $1,6 + 2,0 \cdot 10^{-6}$. Рассмотрено влияние дифракции.

Высокая точность измерения позволила применить радиointерферометр для измерения скорости света.

Иллюстраций 3.



УДК 531.717

Новый прибор для измерения наружных диаметров крупногабаритных изделий методом опоясывания

А. Д. Рубинов

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968, стр. 140—145.

Описан прибор для измерения наружных диаметров 1,5—7,5 м методом опоясывания с помощью стальной ленты, а также устройство к измерительной машине для проверки лент.

Иллюстраций 7.

УДК 620.181.428.4: 536.413

Установка для исследования теплового расширения твердых тел при низких температурах

А. Н. Аматауна, Е. Б. Шевченко

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 146—152.

Описана конструкция интерференционного dilatометра ВНИИМ ДИН-3, позволяющего определять температурные коэффициенты удлинения твердых материалов абсолютным методом в интервале температур $(-190) \div (+20)^\circ \text{C}$ с погрешностью $1 \div 2 \cdot 10^{-8} \text{ град}^{-1}$.

Приведены результаты предварительного исследования dilatометра.

Иллюстраций 5, библиографий 4.

УДК 531.715.27: 531.717.82

Исследование оптической линейки ИС-36

Е. П. Алексеева, М. Г. Богуславский, Т. И. Калинина

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 153—161.

В статье приведены результаты исследования оптической линейки ИС-36 для проверки непрямолинейности. На основании исследований уточнены погрешности измерения и методика пользования линейкой. Произведен анализ составляющих погрешностей и вычислена суммарная погрешность прибора. Разработан метод поверки прибора и определена область применения линейки ИС-36 в промышленности.

Таблиц 3, иллюстраций 3.

УДК 531.717.2: 621.833

О некоторых вопросах измерения элементов зубчатых колес и поверки зубоизмерительного оборудования

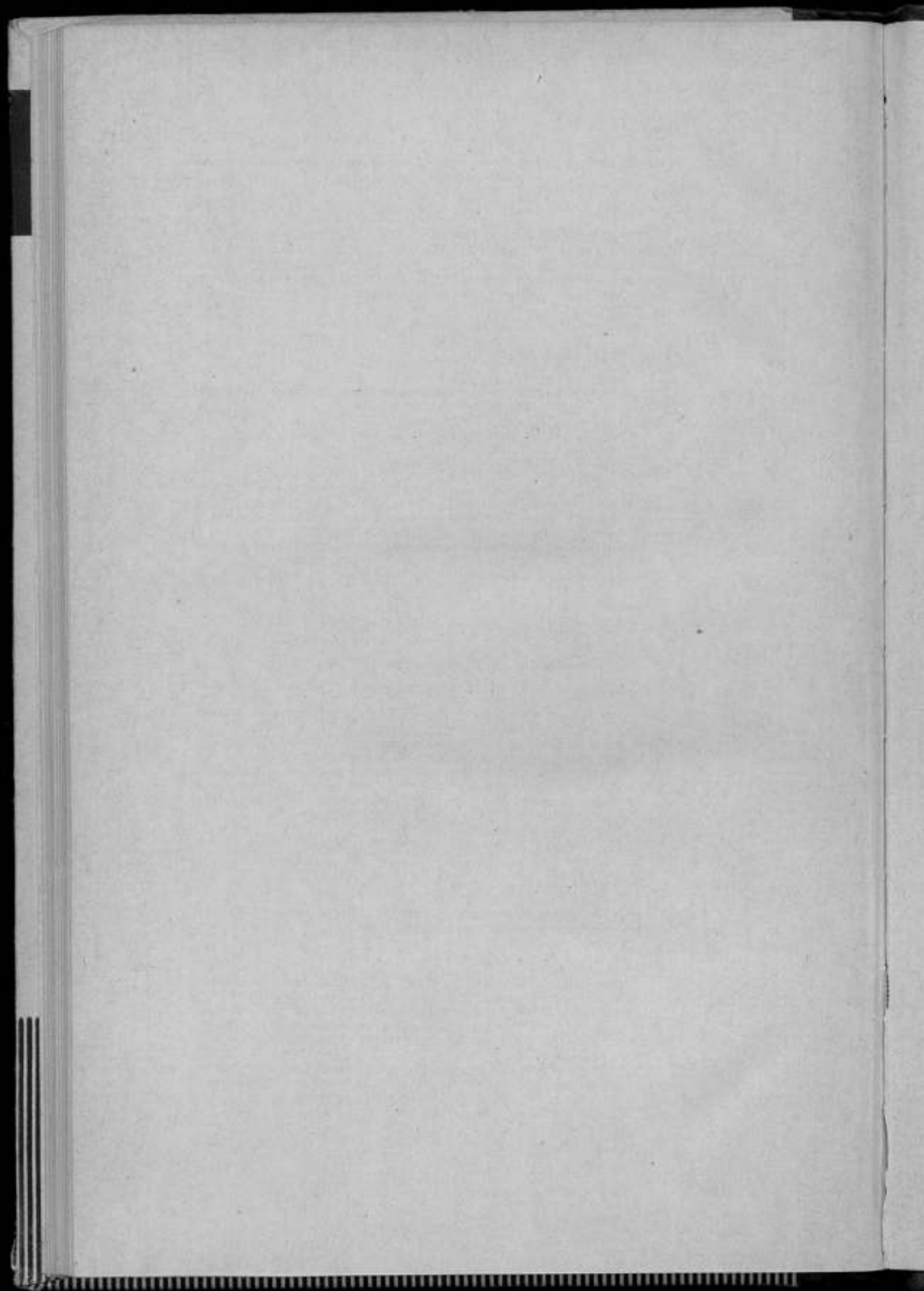
Г. Я. Гафанович, Г. С. Симкин

Труды метрологических институтов СССР, Исследования в области линейных измерений, вып. 101 (151), 1968 г., стр. 162—166.

Рассмотрены вопросы измерения зубчатых колес высокой точности, а также соотношения между комплексными и поэлементными методами контроля. Указаны элементы зубчатых колес, существенно влияющие на работу передачи.

Даны рекомендации по применению зубоизмерительного оборудования для контроля зубчатых колес различных степеней точности и методике поверки некоторых, наиболее точных приборов.

Таблиц 2, библиографий 5.



**ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ
ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 101 (151)

Редактор *Н. Н. Александрова*

Тех. редактор *Э. Г. Вагер*

Корректор *Л. Н. Панина*

М-16478. Сдано в набор 14/XI 1967 г. Подписано
к печати 30/VIII 1968 г. Формат 70×108²/₁₆
Объем 11,5 п. л. 3-й изд. л. 12
Тираж 2000 экз. Цена 1 р. 56 к. Изд. № 26
Заказ № 1818. Тем. план 1967 г. № 3
Бумага типографская № 1

Ленинградская типография № 6
Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Моисеенко, 10

Срп

9

56

59

80

134

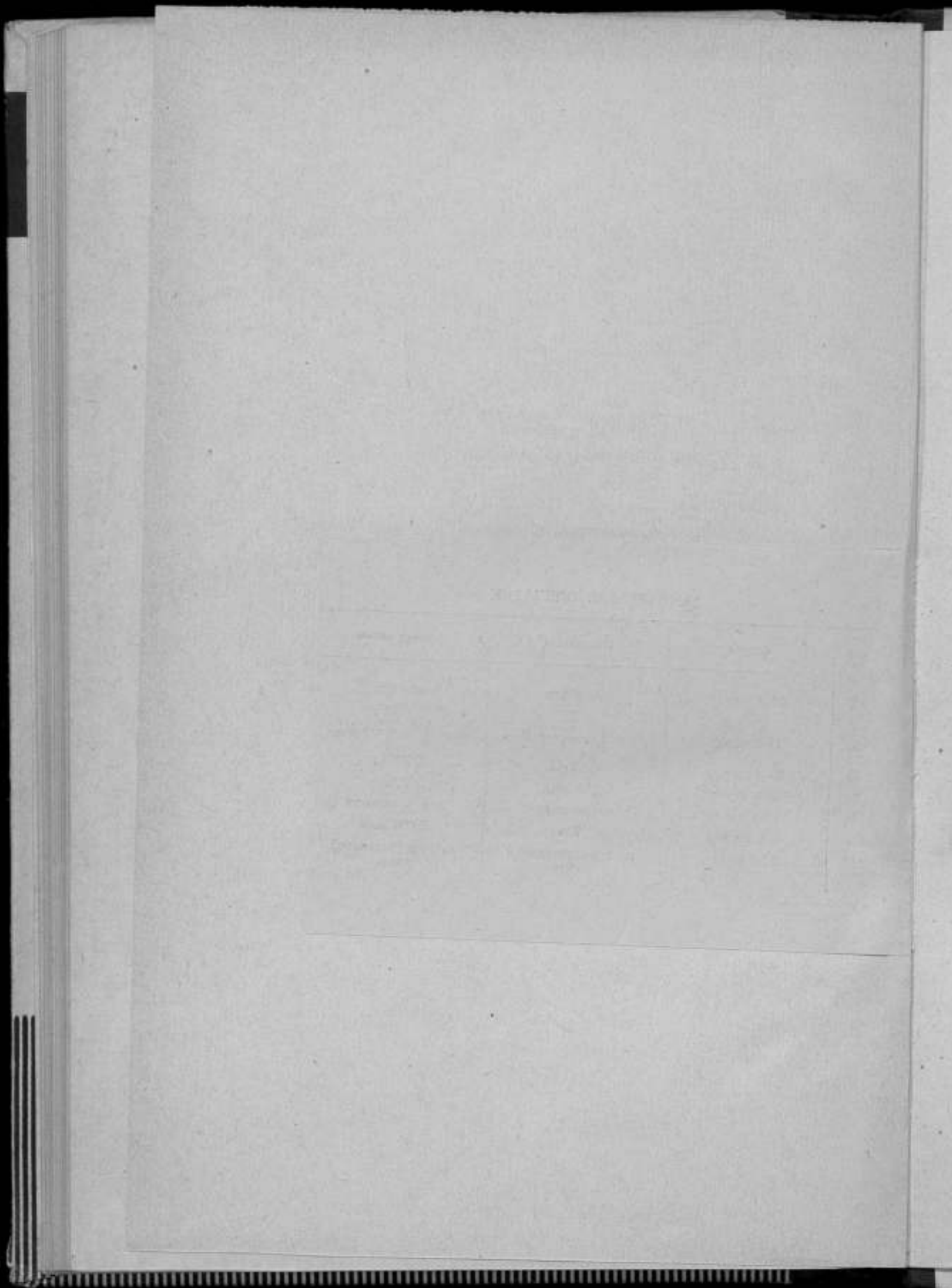
147

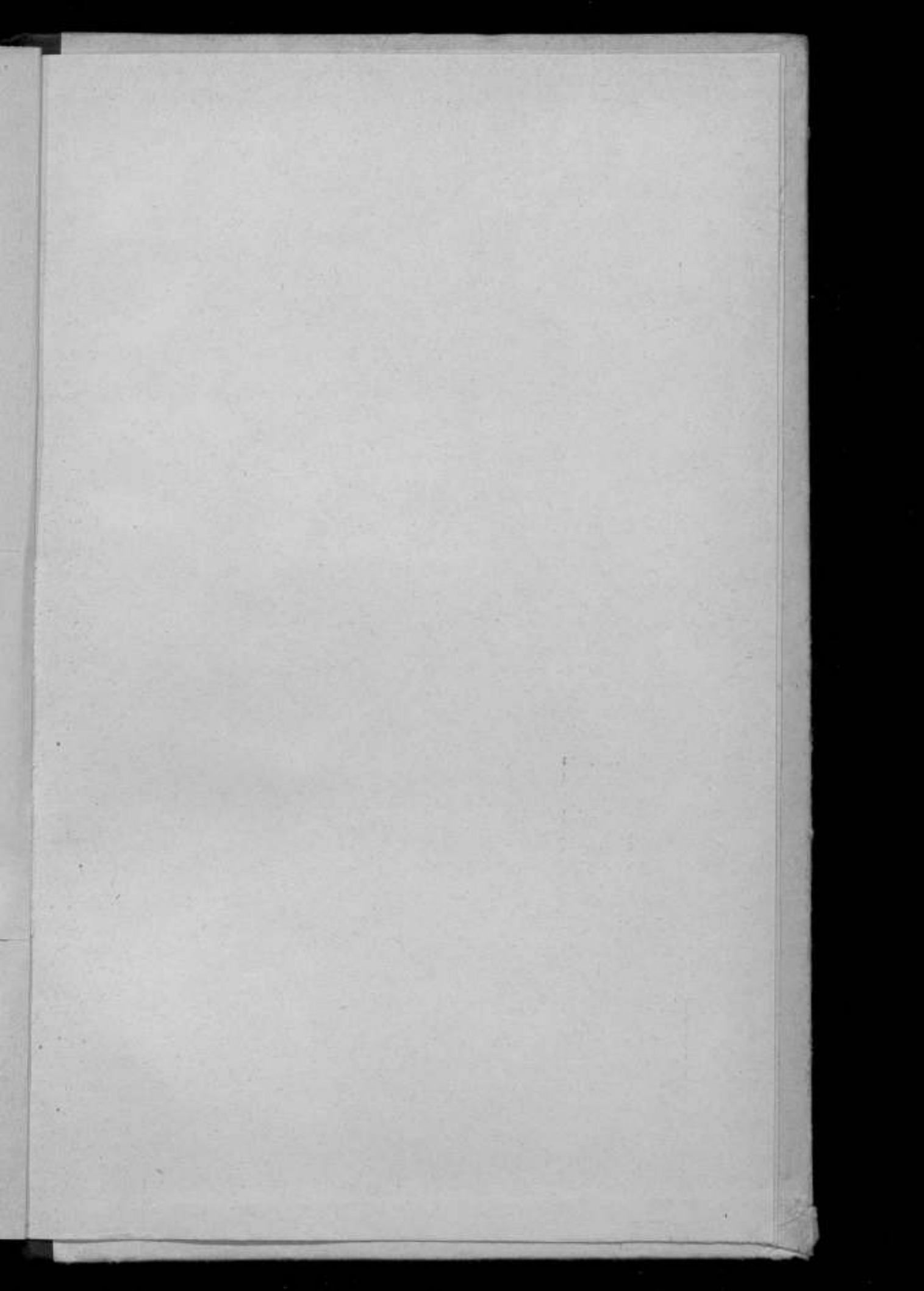
147

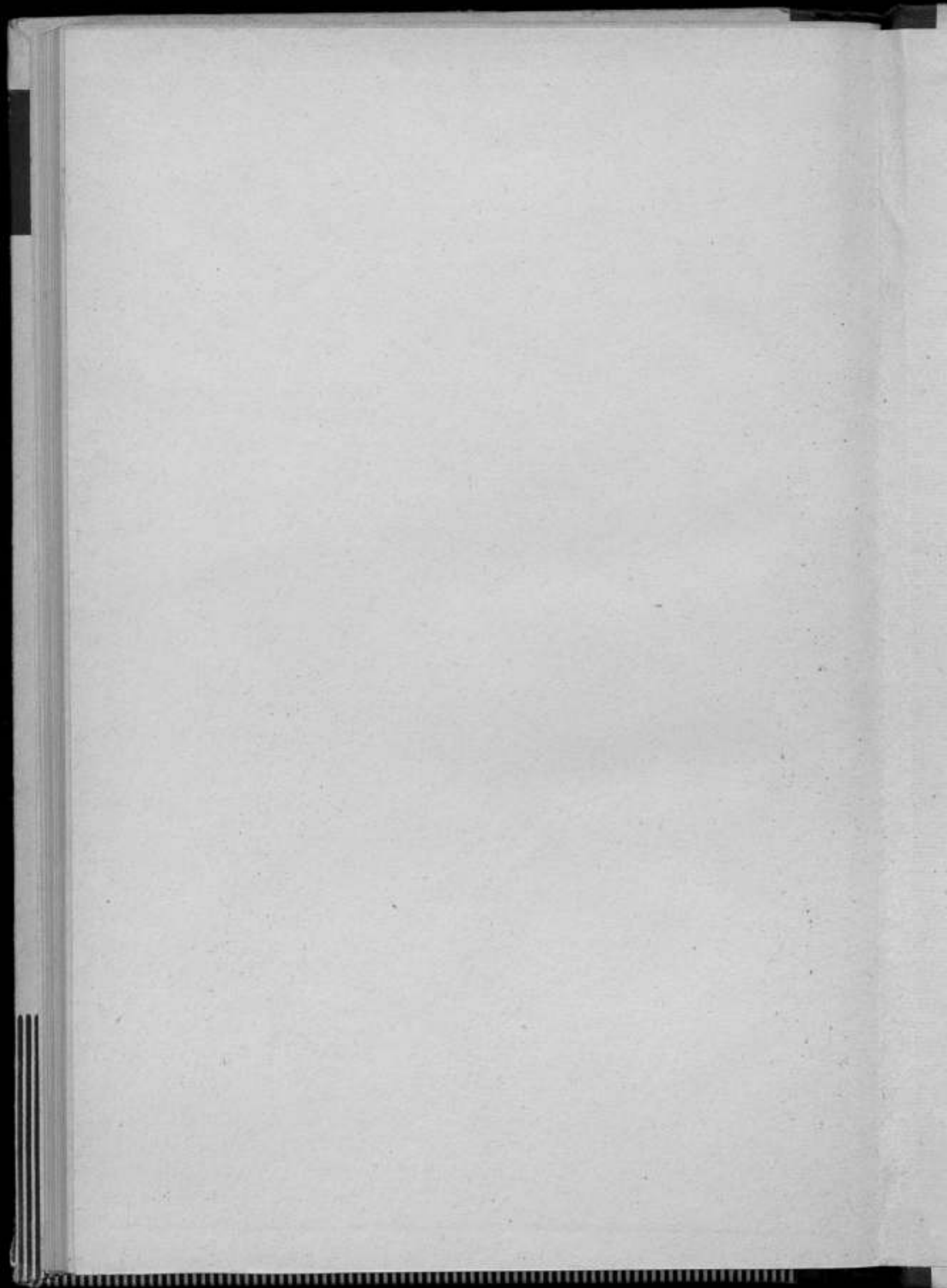
3a

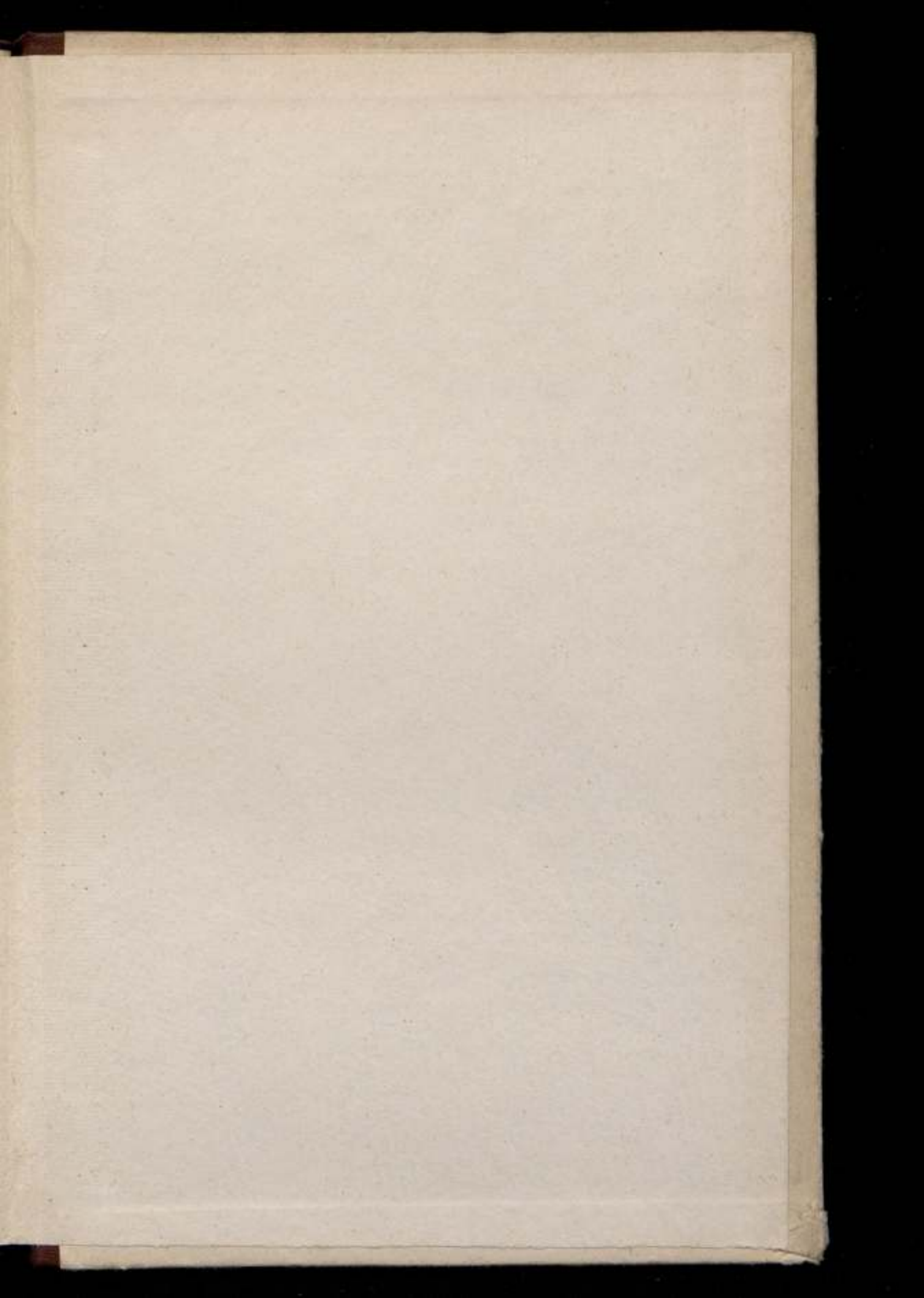
ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
9	25-я сверху	его к оси	его оси
56	17-я снизу	$R_c = \sqrt{\frac{L_{ст}^2}{4} + H_{ст}^2}$	$R_c = \sqrt{\frac{L_{ст}^2}{4} + H_{ст}^2}$
59	26-я сверху	ОКТ-11	ОКГ-11
80	22-я снизу	0,99 мкм	0,99
134	15-я снизу	радиоволи	для радиоволи
147	4-я сверху	0,05 мкм	0,005 мкм
147	22-я снизу	на горизонтальной плите	на горизонтальной плате









1 р. 55 коп.