

С. М. Латыев

# КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ



Ленинград  
«Машиностроение»  
Ленинградское отделение  
1985

ББК 34.9  
Л27  
УДК 681.7 : 681.4.075

Рецензент канд. техн. наук В. А. Зверев

Латыев С. М.

Л27 Компенсация погрешностей в оптических приборах. — Л.:  
Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 248 с., ил.

1 р. 30 к.

В книге изложены методы повышения показателей качества оптических приборов путем компенсации погрешностей, возникающих при их изготовлении и эксплуатации. Даны теоретические основы расчета компенсаторов и методы повышения качества приборов на стадии проектирования. Рассмотрены типовые компенсаторы погрешностей оптических функциональных устройств, механизмов и принципы процесса компенсации.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся конструированием, изготовлением и эксплуатацией оптических приборов.

Л 2706000000-150  
038 (01)-85 150-85

ББК 34.9  
6П5.8

Святослав Михайлович ЛАТЫЕВ

## КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

Редактор Л. М. Манучарян  
Художественный редактор С. С. Венедиктов  
Технический редактор Т. М. Жилич  
Корректоры: И. Г. Иванова, А. И. Лавриненко  
Обложка художника А. Ф. Каширских

ИБ № 4094

Сдано в набор 06.11.84. Подписано в печать 02.04.85. М-21372. Формат 60×90<sup>1/16</sup>.  
Бумага типографская № 3. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл.печ.л. 15,5.  
Усл.кр.-отт. 16,5. Уч.-изд. л. 17,2. Тираж 3090 экз. Заказ 12. Цена 1 р. 30 к.

Ленинградское отделение ордена Трудового Красного Знамени  
издательства «Машиностроение», 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени  
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой  
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
193144, Ленинград, ул. Монсеенко, 10.

© Издательство «Машиностроение», 1985 г.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современные тенденции развития точного приборостроения ставят перед оптической промышленностью задачу по дальнейшему и значительному повышению качества выпускаемых изделий. В этой связи большое значение имеет систематизация и развитие путей и методов повышения качества оптических приборов.

Одним из путей повышения показателей качества приборов является компенсация погрешностей, возникающих при изготовлении и эксплуатации приборов. Этот способ весьма эффективен и позволяет не только получить требуемые показатели качества, но и расширить допуски на изготовление и сборку деталей и узлов прибора, а также повысить производительность работы прибора. В настоящее время накоплен достаточно большой опыт по применению компенсаторов погрешностей в точном приборостроении и машиностроении. Компенсаторы погрешностей некоторых механизмов рассмотрены в работах [15, 38, 48], компенсаторы погрешностей приводов станков и передач — в работах [20, 44], электронных измерительных устройств — в работах [2, 5, 12]. Некоторые вопросы компенсации погрешностей в оптических приборах (ОП) изложены в статьях и работах по юстировке приборов [9, 17, 33, 47, 54].

Вместе с тем следует отметить, что многие задачи, возникающие при использовании компенсации погрешностей, еще не решены, поэтому эффективность применения этого способа повышения качества приборов используется не в полной мере и существенно зависит от опытности разработчика (конструктора). На практике бывают случаи, когда требуемые показатели качества прибора невозможно получить из-за того, что не предусмотрены необходимые компенсаторы, или они предусмотрены там, где в них нет надобности. Зачастую применяемый компенсатор не обладает достаточным диапазоном работы, необходимой чувствительностью и надежностью. Метод компенсации бывает не согласован с объемом выпуска приборов и условиями производства. Указанные недостатки, как правило, выявляются только при изготовлении опытных образцов или в процессе эксплуатации прибора, когда их уже трудно или невозможно устранить.

Использование достижений науки и передового опыта по компенсационному методу повышения качества изделий особенно важным является для ОП, ни один из которых не обходится без юстировки, основанной, как известно [32, 54], на компенсации погрешностей изготовления и сборки деталей прибора с помощью тех или иных компенсаторов. Однако в литературе практически отсутствуют описания способов компенсации погрешностей ОП, основ теории компенсации систематических и случайных погрешностей, методик расчета компенсаторов, а также работы по систематизации и классификации

типовых компенсаторов погрешностей ОП, которые позволили бы еще на стадии разработки схем, конструкций и технологических процессов изготовления и юстировки прибора эффективно применять компенсацию погрешностей для повышения показателей качества.

В предлагаемой книге сделана попытка осветить некоторые вопросы компенсации погрешностей, не нашедшие достаточного отражения в литературе, а также обобщить практический опыт по применению компенсаторов погрешностей функциональных устройств ОП. Автор выражает признательность сотрудникам ЛОМО, ГОИ и ЛИТМО А. С. Васильеву, В. П. Трегубу, В. А. Звереву, В. В. Бобаеву, Ю. А. Степину, Е. А. Васильеву, Г. В. Погареву, А. М. Бурбаеву, Н. И. Кручининой за предоставление материалов и обсуждение некоторых разделов рукописи. Автор будет благодарен читателям за все замечания и пожелания, которые они сочтут нужным сделать, и просит направлять их по адресу: 191065, Ленинград, ул. Дзержинского, 10, ЛО издательства «Машиностроение».



## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Для современного оптического приборостроения характерным является неуклонное повышение требований к качеству производимой продукции — точности, надежности, качеству изображения, экономичности (технологичности) производства. Успешное выполнение нормируемых техническим заданием показателей качества при проектировании новых и модернизации выпускаемых приборов зависит от критического анализа вариантов схемных, конструктивных, технологических и других решений с целью выявления и устранения недостатков.

Рассмотрим методы повышения качества ОП при проектировании в случае, когда первоначальное решение не обеспечивает требуемых показателей качества, особенности этих методов и взаимосвязь.

### 1.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Качеством продукции называется совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением [39]. Качество прибора отражает способность выполнять его функциональное назначение в соответствии с техническими условиями. Для объективной оценки качества прибора его свойства необходимо характеризовать количественно — показателями качества.

Показатели качества характеризуют технико-экономические особенности прибора и классифицируются по следующим основным группам [39].

Показатели назначения характеризуют назначение, область применения, производительность, точность, светосилу, разрешающую способность, дальность действия, конструктивные особенности.

Показатели надежности характеризуют безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость прибора.

Показатели технологичности характеризуют степень соответствия прибора и его элементов оптимальным условиям современного производства. Важнейшими технологическими показателями качества продукции являются коэффициент сборности (блочности) изделия, коэффициент использования рациональных материалов, удельная трудоемкость.

Эргономические показатели позволяют оценивать степень приспособленности прибора к взаимодействию с человеком (с точки зрения удобства, гигиены и безопасности труда и т. п.).

Эстетические показатели характеризуют внешний вид прибора, его соответствие современному стилю, гармоническому сочетанию элементов прибора между собой, соответствие формы прибора его назначению.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют степень использования и применения в данном приборе стандартизованных унифицированных и заимствованных узлов и деталей.

Патентно-правовые показатели характеризуют патентоспособность и патентную чистоту схемных и конструктивных решений прибора.

Наиболее многочисленной группой являются показатели назначения. Для оптических приборов существуют как общие показатели назначения (показатели точности функционирования, качества изображения), так и частные (показатели, характеризующие параллельность визирных осей бинокулярных приборов, увеличение микроскопов, светосилу фотографических приборов и т. д.).

Компенсацию погрешностей мы будем рассматривать преимущественно на основе обеспечения с ее помощью общих показателей назначения оптических приборов. Вопросы применения компенсаторов для обеспечения частных показателей назначения, а также показателей надежности, технологичности и других решаются аналогично.

Рассмотрим, какими показателями характеризуются качество изображения, создаваемого оптической системой прибора, и точность его функционирования.

**Показатели качества изображения.** Эти показатели характеризуют способность оптической системы прибора создавать изображение высокого качества, т. е. геометрически подобное предмету, неискаженное по форме, с правильной передачей деталей, контраста и цвета. Кроме того, изображение предмета должно занимать правильное пространственное положение (чтобы не было параллакса, поворота и наклона изображения). В настоящее время нет единого показателя (критерия) качества изображения, характеризующего все перечисленные требования.

На практике качество изображения, создаваемое оптической системой, оценивают следующими основными показателями: разрешающей способностью, остаточными волновыми или геометрическими aberrациями, частотно-контрастной характеристикой.

Качество изображения с точки зрения правильности его пространственного положения оценивают значениями расфокусировки, углового или линейного параллакса, наклона и поворота изображения.

**Показатели точности функционирования прибора.** В большинстве ОП происходит не только оптическое, но и механическое, электрическое и другие виды преобразований сигнала. Качество таких приборов определяется уже не только показателями качества изображения, но и показателями точности его функционирования, т. е. показателями, характеризующими потери информации при преобразовании сигнала от объекта всеми функциональными устройствами прибора. Показателями точности функционирования прибора являются:

погрешность прибора — разность между действительным и расчетным (идеальным) значениями информативного параметра выход.

ного сигнала прибора, соответствующими информативному параметру входного сигнала;

погрешность функционирования прибора — разность между действительным и расчетным изменениями информативного параметра выходного сигнала прибора, соответствующими изменению информативного параметра входного сигнала;

погрешность воспроизводимости прибора — разность действительных значений информативного параметра выходного сигнала прибора, соответствующих одному и тому же информативному параметру входного сигнала при повторных циклах функционирования.

Таковыми же показателями характеризуется и точность работы функциональных устройств прибора. Например, показателями точности работы механизмов являются погрешности положения ведомого звена, перемещения и погрешность от мертвого хода — основная причина погрешности воспроизводимости механизмов [55].

Основным показателем точности как приборов, так и функциональных устройств является погрешность функционирования, которая в соответствии с ГОСТ 8.009—72 нормируется характеристиками систематической и случайной ее составляющих либо характеристиками ее суммарной погрешности.

## **1.2. ПОГРЕШНОСТИ И ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА КАЧЕСТВО ПРИБОРА**

Погрешности, возникающие при изготовлении и эксплуатации прибора, в существенной мере влияют на большинство его показателей назначения, а также на показатели надежности и технологичности. Рассмотрим подробнее погрешности, влияющие на показатели качества изображения, создаваемого оптической системой, и на показатели точности функционирования..

**Погрешности, влияющие на качество изображения.** На качество изображения, создаваемого оптической системой, влияют погрешности, которые можно объединить в следующие группы:

1) отклонения от расчетных характеристик материала оптических деталей (показателя преломления, средней дисперсии);

2) погрешности изготовления деталей (радиусов, кривизны, толщины, клиновидности);

3) погрешности сборки оптической системы (децентровки, деформации, отклонения от расчетных воздушных промежутков);

4) погрешности, возникающие при эксплуатации оптического прибора из-за изменения температуры, атмосферного давления, вибраций, рефракций воздушных слоев и т. д.

**Погрешности, влияющие на точность прибора.** Погрешность функционирования прибора обусловлена потерями информации еще до поступления на чувствительный элемент прибора, в приборе и при регистрации результатов.

Доприборные или методические погрешности обусловлены ошибочностью или недостаточностью разработки принятой теории метода функционирования либо допущениями в отношении объекта, сигнала

или канала прохождения сигнала. Методические погрешности характерны для приборов, принцип действия которых основан на косвенных методах измерения. Например, в функции, заложенной в основу работы импульсных светодальномеров:  $D = Ct/2n$ , где  $D$  — дистанция до объекта;  $C$  — скорость света в вакууме;  $t$  — время прохождения излучения до объекта и обратно;  $n$  — показатель преломления среды, предполагается, что скорость света и показатель преломления среды на трассе измерения постоянны и равны некоторым конкретным значениям. При реальных измерениях эти параметры могут отличаться от принятых значений, что приводит к погрешности

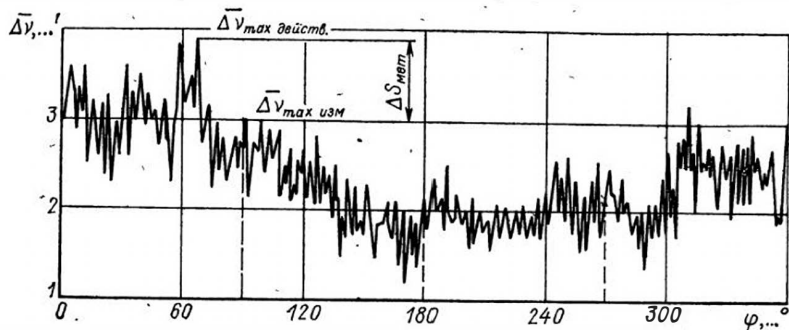


Рис. 1.1. График погрешности от мертвого хода двухпарного зубчатого редуктора

измерения дистанции. Другим примером методической погрешности может служить погрешность, возникающая из-за дискретности измерений. На рис. 1.1 изображен график погрешности от мертвого хода зубчатого редуктора, измеренной через  $1^\circ$  поворота ( $\varphi$ ) ведомого звена (примерно две точки контроля на зуб ведомого колеса). Если такую передачу контролировать в ограниченном числе точек (например, в трех-четырех, как это часто бывает на практике), то может возникнуть большая методическая погрешность, представляющая собой разность между истинным (за которое можно принять в нашем примере значения мертвого хода по графику) и полученным при дискретном измерении, значениями максимальной погрешности:

$$\Delta S_{\text{мет}} = \bar{\Delta v}_{\text{max действ}} - \bar{\Delta v}_{\text{max изм.}}$$

К методическим погрешностям относят также допущения о расположении, температуре, форме объекта и погрешности-ориентирования прибора относительно объекта (например, погрешности, возникающие при измерении линейных перемещений оптиметром из-за наклона его трубки относительно направления перемещения; погрешности измерения углов наклона зеркала автоколлиматором из-за коллимационной ошибки).

В том случае, когда в основу функционирования прибора положено допущение о прямолинейном распространении света на участке от объекта до прибора, к методическим погрешностям следует отнести влияние рефракции воздушных слоев, приводящей к искривлению линии визирования и ухудшению качества изображения. В против-

ном случае ее относят к факторам, приводящим к эксплуатационным погрешностям.

Приборные или инструментальные погрешности обусловлены потерями информации в оптических, механических, электрических и других преобразователях сигнала из-за допущений в заложенной функции преобразования, погрешностей изготовления и сборки элементов, влияния эксплуатационных погрешностей и факторов.

Допущения в функции преобразования сигнала (их называют также теоретическими погрешностями) бывают трех видов [18]: 1) использование вместо строгой теоретической функции, связывающей информативные параметры выходного и входного сигналов, приближенной функции (например, замена тангенсной зависимости, связывающей угол поворота автоколлимационного зеркала с перемещением изображения на сетке автоколлиматора, линейной зависимостью); 2) округления параметров, входящих в функцию преобразования, производимые из-за наличия иррациональных чисел либо требований ГОСТа (например, округление до ближайших значений ГОСТа радиусов кривизны линз, округление модуля зубчатого зацепления до его значения из нормального ряда); 3) конструктивные допущения, характерные для реальных конструкций высших кинематических пар (см. п. 5.3).

Погрешности изготовления и сборки элементов являются технологическими и представляют собой отклонения от расчетных значений характеристик материалов, погрешности размеров, формы и расположения деталей. Технологические погрешности — одни из самых многочисленных и наиболее сильно влияющих на точность функционирования (и качество изображения) прибора первичных погрешностей. Эксплуатационные погрешности представляют собой погрешности размеров, форм и положения деталей, а также изменения характеристик материалов, источников и приемников излучения из-за влияния нагрузок, вибраций, сил трения, перепада температуры, давления, влажности, радиационного излучения и т. п.

Погрешности регистрации обусловлены потерями информации при регистрации результатов функционирования прибора. Эти погрешности связаны, как правило, с оператором и вызваны запаздыванием или опережением регистрации сигнала, погрешностями считывания результата, управления (наведения), настройки и выверки прибора, обработки результатов.

Погрешности регистрации условно выделены в отдельную группу и связаны не только с объективными параметрами и характеристиками прибора, но и с субъективными психо-физиологическими возможностями оператора. Так как погрешности считывания и наведения зависят от конструктивных параметров прибора, то их часто относят к эксплуатационным инструментальным погрешностям. Погрешности обработки результатов, особенно в случае, когда прибор выдает их в неявном виде, относят к методическим погрешностям. Погрешности настройки и выверки могут быть отнесены к тем и другим.

Перечисленные погрешности, влияющие на качество ОП, будем называть первичными погрешностями и факторами. Они представляют собой отклонения от номинальных значений конструктивных параметров деталей и сборочных единиц<sup>1</sup>, изменения влияющих факторов ( $\Delta q$ ), отклонения от расчетных значений функций преобразования сигнала в приборе ( $\Delta f$ ) и отклонение информативного параметра сигнала, поступающего на вход прибора, от его номинального значения ( $\Delta x$ ):  $\Delta q = q - q_0$ ;  $\Delta q' = q' - q'_0$ ;  $\Delta f = f - f_0$ ;  $\Delta x = x - x_0$ , где  $q$ ,  $q'$ ,  $x$  — действительные значения конструктивных параметров, влияющих факторов и информативного параметра входного сигнала соответственно;  $q_0$ ,  $q'_0$ ,  $x_0$  — номинальные значения конструктивных параметров, влияющих факторов и информативного параметра входного сигнала соответственно;  $f$ ,  $f_0$  — действительная и номинальная функции, связывающие информативные параметры  $y$  и  $x$  выходного и входного сигналов соответственно.

Заметим, что первичные факторы приводят к изменению конструктивных параметров деталей и сборочных единиц, т. е. оказывают влияние на качество прибора посредством  $\Delta q$ , причем один первичный фактор (например, изменение температуры) может действовать на изменение как одного, так и нескольких конструктивных параметров одновременно.

Каждая отдельная первичная погрешность и фактор влияют на тот или иной показатель качества ОП, это влияние будем называть в дальнейшем частичным влиянием (частичной погрешностью, расфокусировкой, параллаксом) и обозначать:  $\Delta y_{\Delta q}$ ,  $\Delta y_{\Delta q'}$ ,  $\Delta y_{\Delta x}$ ,  $\Delta y_{\Delta f}$ . Функция, связывающая частичное влияние с первичной погрешностью или фактором, может быть в общем случае как линейной, так и нелинейной, и называется передаточной функцией (коэффициентом влияния) первичной погрешности (фактора).

Основное внимание при компенсации погрешностей будет уделено инструментальным погрешностям, оказывающим доминирующее влияние на точность работы и качество изображения ОП.

**Классификация погрешностей, влияющих на качество прибора.** Как уже отмечалось, на качество прибора влияет большое количество разнообразных первичных погрешностей и факторов. По природе возникновения они могут быть случайными и неслучайными. По результату действия погрешности подразделяются на оказывающие случайное и неслучайное воздействие на качество партии приборов и каждого прибора в отдельности.

Случайными по своей природе являются погрешности и факторы, изменяющиеся нерегулярно, все они претерпевают рассеяние при

<sup>1</sup> Погрешности конструктивных параметров сборочных единиц являются комплексными [18], обусловленными первичными погрешностями изготовления и сборки деталей. Обычно в качестве комплексных первичных погрешностей принимают погрешности покупных элементов (например, шарикоподшипников, фотоприемников) и погрешности сборочных единиц, нормируемых комплексным показателем (например, кинематическая погрешность зубчатых колес, погрешность фокусного расстояния склейки объектива и т. д.).

возникновении и не могут быть заранее определены однозначно по своим параметрам.

К таким погрешностям относятся все погрешности технологического характера (фокусных расстояний линз, углов призм, децентровки, эксцентриситеты шкал, лимбов), отклонения свойств материалов, эксплуатационные погрешности, обусловленные действием случайных факторов (из-за влияния сил трения, вибраций, турбулентности атмосферы, нестационарных температурных полей).

Некоторые из случайных погрешностей могут иметь систематическую (неслучайную) составляющую. Например, погрешность диа-

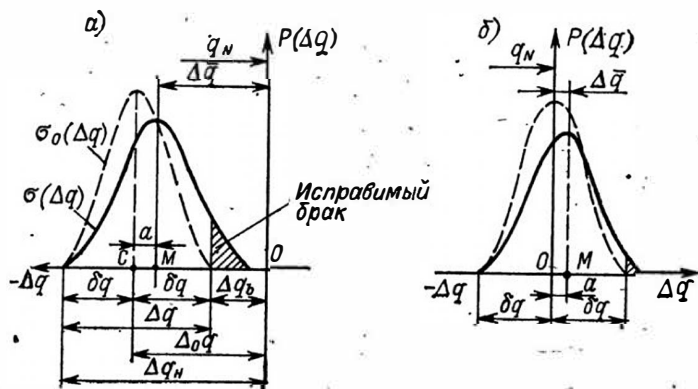


Рис. 1.2. Поля рассеяния диаметра (а) и толщины (б) линзы

метра линзы — величина случайная, однако, претерпевая рассеяние в поле допуска, эта погрешность имеет один знак (минус), определяемый заданным односторонним полем допуска. Систематическая составляющая (рис. 1.2, а) определяется координатой середины поля допуска  $\Delta_0 q = 0,5 (\Delta q_v + \Delta q_n)$ , где  $\Delta q_v$ ,  $\Delta q_n$  — верхнее и нижнее предельные отклонения поля допуска соответственно.

Так как при изготовлении линзы стремятся избежать неисправимого брака, то действительное поле рассеяния  $\sigma(\Delta q)$  смещено относительно поля допуска и исходного рассеяния  $\sigma_0(\Delta q)$  (за которое обычно принимается рассеяние, подчиняющееся закону Гаусса) на величину  $a$ . Таким образом центр группирования  $M$  действительного рассеяния не совпадает с центром поля допуска  $C$  и среднее (неслучайное) значение первичной погрешности равно  $\bar{\Delta q} = \Delta_0 q + a$ . Значение  $a$  зависит от метода обработки (автоматический, пробных проходов),  $a = (0 \div 0,2) \Delta q$  [37]. При расчетах пользуются относительным значением  $a$ , которое называется относительным коэффициентом асимметрии  $\alpha_q = a/\delta q$ , где  $\delta q$  — половина поля допуска.

Тогда

$$\bar{\Delta q} = \Delta_0 q + \alpha_q \delta q. \quad (1.1)$$

Для записи систематической составляющей случайной погрешности удобно пользоваться так называемым приведенным коэффициентом асимметрии поля допуска [18]

$$C_q = \overline{\Delta q} / \delta q = \Delta_0 q / \delta q + \alpha_q, \quad (1.2)$$

откуда  $\overline{\Delta q} = C_q \delta q$ .

В тех случаях, когда задан симметричный допуск на параметр детали (расстояние между отверстиями, угловые размеры, толщины линз и пластин), или же происходит симметричное рассеяние значений погрешности или влияющего фактора, систематическая составляющая отсутствует ( $C_q = 0$ ) либо определяется только смещением центра действительного поля рассеяния от номинального ( $C_q = \alpha_q$ ). Примером этого является погрешность толщины линзы (рис. 1.2, б), среднее значение которой несколько больше номинального значения из-за стремления рабочего-оптика иметь возможность удалить возникшую царапину или иметь запас для подгонки радиуса под пробное стекло.

Неслучайными по своей природе являются погрешности, неизменяющиеся или изменяющиеся закономерно, параметры их могут быть заранее определены. К ним относятся некоторые методические, теоретические, эксплуатационные погрешности, обусловленные действием систематических факторов (например, деформации от известных сил, температурные деформации от стационарных температурных полей).

Заметим, что деформации от известных сил и температурные деформации относят к систематическим погрешностям условно, так как они имеют случайную составляющую, из-за влияния случайных факторов. Например, угол скручивания валика под действием некоторого момента может быть рассчитан заранее по известному моменту сил, диаметру валика, модулю сдвига материала и длины скручиваемого участка. Однако значение действительного угла может отличаться от рассчитанного из-за погрешности изготовления диаметра и отклонений характеристик материала от расчетных. Рассчитанное значение зазора между оправой и диаметром линзы при заданном изменении температуры может отличаться от действительного из-за погрешностей изготовления их диаметров и отклонений коэффициентов линейного расширения материалов от расчетных. Так как рассчитанное значение таких погрешностей мало отличается от действительных значений (мала случайная составляющая), то эти погрешности принято относить к систематическим.

По характеру воздействия на качество прибора погрешности также можно классифицировать на случайные и неслучайные. Эту классификацию осуществляют для партии приборов (т. е. для случая, когда прибор не изготовлен) и для конкретного экземпляра (для учета изменения погрешностей при повторных циклах функционирования прибора).

Например, для партии приборов практически все погрешности технологического происхождения (за исключением отклонений характеристик материала оптических деталей из стекла одной плавки)



оказывают случайное воздействие на качество прибора. Для конкретного же экземпляра эти погрешности оказывают неслучайное влияние на качество.

Рассмотрим погрешности фокусного расстояния объектива и эксцентриситет лимба. Для партии приборов их влияние на качество случайное, так как неизвестны ни значение, ни знак погрешности. На единичный экземпляр эти погрешности оказывают неслучайное влияние, так как для конкретного прибора известны их значение и знак. При повторных циклах функционирования прибора они будут оказывать одно и то же влияние на его качество и не претерпевать рассеяния.

Некоторые погрешности оказывают случайное влияние как на качество всей партии приборов, так и на качество единичного прибора. К ним относятся, например, рефракция воздушного тракта, влияние сил трения, случайные погрешности считывания и др. Неслучайные по своей природе причины и факторы оказывают закономерное влияние на качество всей партии и единичного прибора. Например, теоретическая погрешность автоколлиматора оказывает одинаковое действие на точность работы как отдельного прибора, так и всей партии приборов.

По характеру изменения значений первичные погрешности и факторы подразделяются на неизменяющиеся (постоянные), переменные регулярные, переменные нерегулярные и смешанные. Изменение или постоянство их значений рассматривают в зависимости от изменения выходного (или входного) информативного параметра прибора в процессе его функционирования (изменения из-за износа и старения материалов при этом не учитываются).

К постоянным относят такие погрешности, значения которых не изменяются в функции  $y$ , это отклонения свойств материалов, технологические погрешности размеров и положений деталей (погрешности толщин линз, углов призм, децентровки и перекосы поверхностей), деформации от постоянных нагрузок.

К переменным регулярным относят те погрешности, которые изменяются закономерно в функции  $y$ . Примером может служить изменение деформации трубы телескопа (гнутие телескопа) под действием силы тяжести в случае изменения угла места, а также теоретические погрешности.

К переменным нерегулярным относят погрешности и факторы, изменяющиеся нерегулярно в функции  $y$ . Это, например, шероховатость поверхностей деталей, биение колец шарикоподшипников, эксплуатационные погрешности из-за нестабильности сил трения и прочих случайных факторов.

К смешанным относятся погрешности, изменение которых в функции  $y$  имеет постоянную или переменную регулярную и переменную нерегулярную составляющие. Это погрешности деления линейных и круговых шкал, шага винта, кинематические погрешности зубчатых колес.

По направлению первичные погрешности и факторы подразделяются на скалярные и векторные. Скалярные характеризуются

только численным значением (с учетом знака), направление отсчета которого вполне определено. Это погрешности размеров деталей, деформации от сил тяжести, изменения размеров при колебании температуры. Векторные погрешности характеризуются численным значением и направлением. При расчетах направление векторных погрешностей считают неспределенным и заранее неизвестным. К ним относятся децентрировки линз, эксцентриситеты шкал, смещения из-за вибраций, турбулентность атмосферы.

Частичные влияния первичных погрешностей в зависимости от характера вызываемых их первичных погрешностей также подразделяются на случайные и неслучайные.

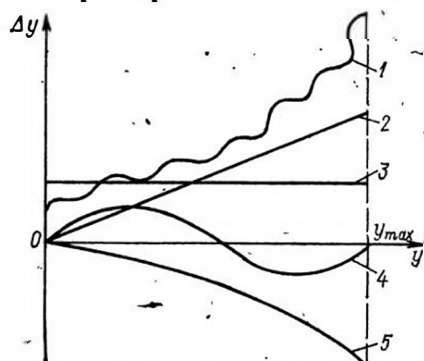


Рис. 1.3. Графики частных погрешностей:

1 — комбинированной; 2 — мультипликативной; 3 — аддитивной; 4 — периодической; 5 — степенной

В зависимости от характера изменения частичного влияния (погрешности) в функции выходного информативного параметра прибора их подразделяют [5] на аддитивные, мультипликативные, степенные, периодические и комбинированные (рис. 1.3). Вид частичной погрешности зависит не только от изменения значения первичной погрешности (в функции  $y$ ), но и от вида их связывающей передаточной функции.

Аддитивные частичные погрешности (например, погрешность от сбоя шкалы прибора) имеют постоянное значение, не зависящее от  $y$  ( $\Delta y = \text{const}$ ). Мультипликативные погрешности (накопленные) изменяются пропорционально  $y$  ( $\Delta y = ky$ ). Примером может служить погрешность измерения угла наклона зеркала автоколлиматором из-за погрешности фокусного расстояния объектива, расфокусировка на краю поля из-за разворота светоделительного зеркала вокруг оси, перпендикулярной к плоскости падения луча. Степенная погрешность имеет вид  $\Delta y = ky^m$ . Такой характер имеют обычно теоретические погрешности, аберрации оптической системы (например, кома и дисторсия из-за децентрировок линз). Периодические частичные погрешности изменяются в функции  $y$  по периодическому закону (например,  $\Delta y = a \sin ky$ ). Типичными примерами являются погрешность углоизмерительного прибора, обусловленная эксцентриситетом его лимба, и наклон изображения из-за погрешности установки плоского зеркала в сходящемся пучке лучей. Некоторые погрешности имеют комбинированный характер. Как правило, это погрешности, обусловленные смешанными первичными погрешностями (например, погрешность измерения размеров окулярным винтовым микрометром из-за погрешности шага винта).

Классификация первичных погрешностей по природе и воздействию на качество прибора на случайные и неслучайные, знание их

вида и свойств имеет важнейшее значение при расчете компенсаторов, выборе того или иного метода компенсации, разработке методики их юстировки.

### 1.3. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ

В процессе проектирования на стадии анализа технического решения производится проверка соответствия расчетных показателей качества ОП требованиям технического задания. Как правило, первоначальное решение не является удовлетворительным и появляется необходимость повышения показателей качества проектируемого объекта за счет каких-то мероприятий, изменений в конструкции, ужесточения допусков, применения новых технологических процессов. Наиболее эффективно качество объекта может быть повышено именно в процессе проектирования. Существует несколько методов повышения качества ОП.

**Технологический метод** основан на том, что для изготовления прибора используют материалы с высокими показателями, например, стекло первой категории по  $\Delta n_e$ ,  $\Delta(n_F - n_C)$ , по оптической однородности и двойному лучепреломлению; применяются высококачественные элементы (приемники, источники, шарикоподшипники и т. п.); назначаются жесткие допуски на размеры и положение деталей. Такой прием повышения качества ОП связан со значительным удорожанием производства и не может считаться наиболее эффективным. Кроме того, развитие технологических возможностей отстает от предъявляемых требований к точности изготовления элементов и приборов и простое ужесточение допусков на их изготовление и сборку чаще всего не дает желаемого результата. Однако повышение качества технологического оборудования и технологических процессов определяет перспективность данного метода.

Вместе с тем, технологический метод повышения качества прибора следует считать полезным и эффективным при более полном и правильном использовании уже имеющихся технологических возможностей производства. В качестве примера применения этого метода повышения качества прибора сравним новую модификацию круглого поворотного стола СТ-320 с серийно выпускаемым столом СТ-24 (приспособление к универсальному измерительному микроскопу УИМ-24). При разработке этого стола благодаря использованию новых материалов (ЦИАМ Ю-5, фторлон), высококачественных элементов (шаров подшипников с погрешностью диаметров не более 0,1—0,2 мкм), технологических возможностей оборудования удалось повысить точность новой модификации примерно в два раза. В углоизмерительном приборе с односторонним отсчетом одной из основных погрешностей, влияющей на точность работы, является остаточный эксцентриситет лимба после центрировки последнего относительно оси вращения по кольцевой риске или штрихам. Для уменьшения этой погрешности было предложено<sup>1</sup> (рис. 1.4) наносить

<sup>1</sup> А. с. 623709 (СССР).

деления на лимб 4, предварительно закрепив его на оправу 2, используя внутренний диаметр оправы как базу. Диаметры  $D_1$ ,  $D_2$  (валика 5, вокруг которого вращается стол 3, соединенный с лимбом) и  $D_3$  (шаров 1) должны быть изготовлены с большой точностью (погрешности диаметров  $D_1$  и  $D_2$  составляют 0,2—0,3 мкм) во избежании эксцентриситета после сборки узла лимба с валом.

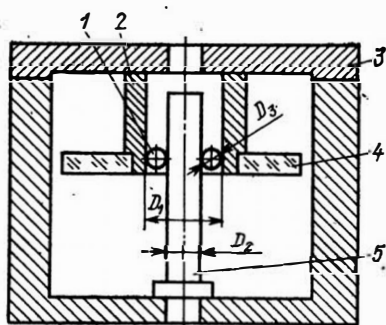


Рис. 1.4. Схема конструкции углоизмерительного стола

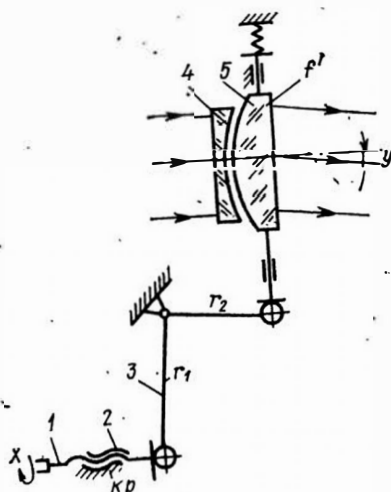


Рис. 1.5. Схема измерительного устройства дальномера

изменение поперечных аберраций при децентрировке поверхностей на 0,01 мм для  $f' = 9$  приведены в табл. 1.1.

Для получения требуемого качества изображения были назначены жесткие и равные допуски на центрировку всех элементов. Однако это не позволило получить хорошего качества всех изготавливаемых объективов. Перераспределение допуска в сторону его существенного расширения (в соответствии с коэффициентами влияния децентрировок поверхностей) на все элементы, но с обеспечением юстировки комы последних линз (см. п. 4.2), позволило

**Проектный метод** повышения качества ОП (наиболее перспективный) основан на рациональном перераспределении допусков и параметров, изменении конструкции отдельных деталей и узлов, схемы или принципа функционирования прибора или его функциональных устройств.

*Рациональное перераспределение допусков* позволяет существенно повысить технологичность прибора, а иногда и его показатели назначения. Например, в объективах допуски на центрировку отдельных линз часто назначают одинаковыми, однако децентрировка каждой линзы влияет на величину аберраций по-разному, поэтому целесообразно расширить допуск на линзы, которые влияют слабо, и сузить допуск на те, которые влияют очень сильно.

Примером этого может служить распределение допуска на центрировку поверхностей объектива «Агат-14» с переменным фокусным расстоянием для кинокамеры «ЛОМО-215». В этом объективе, содержащем 18 поверхностей, фактически только децентрировка поверхностей трех последних линз (особенно последней и предпоследней) существенно влияет на качество изображения (кому). Значения коэффициентов влияния на

получить требуемое качество изображения и повысило технологичность изделия.

Повышение качества изделия *рациональным перераспределением параметров* рассмотрим на примере измерительного устройства оптического дальномера (линзовом компенсаторе) рис. 1.5. С помощью этого устройства производят измерение дистанции до цели посредством измерения параллактического угла  $y$ . Оно содержит афокальную телескопическую систему 4, 5, отклоняющую пучок лучей при перемещении положительного компонента с помощью двуплечного рычага 3 и винтового механизма 1, 2.

Угол  $y$  связан следующей зависимостью с конструктивными параметрами устройства и углом  $x$  поворота винта:

$$y = r_2 k p x / (f' r_1 2\pi),$$

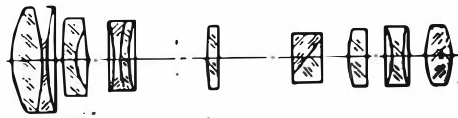
где  $r_1$ ,  $r_2$  — длины плеч рычага;  $k$ ,  $p$  — число заходов и шаг резьбы винта соответственно;  $f'$  — фокусное расстояние линзы 5. В типовых узлах  $y \approx \approx 10'$ ,  $r_1 = r_2$ ;  $k = 1$ ;  $p = 1$  мм, фокусные расстояния линз устройства колеблются в пределах от нескольких метров до 10 м.

Измерение параллактического угла должно производиться с погрешностью не более 0,2—0,3".

Основные погрешности функционирования устройства обусловлены погрешностью фокусного расстояния  $\Delta f'$  линзы  $\Delta y_{\Delta f'} = -y \Delta f' / f'$ ; погрешностью длин плеч рычага  $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$   $\Delta y_{\Delta r_1, \Delta r_2} = \mp y \Delta r_{1,2} / r_{1,2}$ ; погрешностью шага винта  $\Delta p$   $\Delta y_{\Delta p} = r_2 \Delta p / r_1 f'$ ; погрешностью форм опорных поверхностей рычагов  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$   $\Delta y_{\Delta h_1} = r_2 \Delta h_1 / (r_1 f')$ ,  $\Delta y_{\Delta h_2} = = \Delta h_2 / f'$  и осевым зазором  $\Delta c_0$  в винтовой паре  $\Delta y_{\Delta c_0} = r_2 \Delta c_0 / (r_1 f')$ .

Если точность функционирования устройства определялась бы только погрешностью  $\Delta f'$ , то предельный допуск на эту первичную погрешность в относительных единицах был бы равен  $\Delta f' / f' = \Delta y / y = = 0,05\%$ . Такой допуск технологически выдержать невозможно. Следовательно, необходимо компенсировать влияние этой погрешности. Так как эта погрешность, а также  $\Delta y_{\Delta r_2}$  и  $\Delta y_{\Delta r_1}$  носят мультипликативный характер, то регулированием одного из плеч рычага можно произвести взаимокompенсацию их влияния. Регулировкой

Таблица 1.1



| Номер поверхности | Коэффициент влияния   |
|-------------------|-----------------------|
| 1                 | $0,15 \cdot 10^{-2}$  |
| 2                 | $0,3 \cdot 10^{-6}$   |
| 3                 | $0,3 \cdot 10^{-3}$   |
| 4                 | $0,4 \cdot 10^{-3}$   |
| 5                 | $-0,44 \cdot 10^{-2}$ |
| 6                 | $-0,7 \cdot 10^{-3}$  |
| 7                 | $0,6 \cdot 10^{-6}$   |
| 8                 | $-0,46 \cdot 10^{-3}$ |
| 9                 | $0,96 \cdot 10^{-2}$  |
| 10                | $-0,12 \cdot 10^{-2}$ |
| 11                | 0,15 мкм/рад          |
| 12                | 0,15 мкм/рад          |
| 13                | $0,1 \cdot 10^{-1}$   |
| 14                | 0,001 мкм/рад         |
| 15                | -0,44                 |
| 16                | -0,39                 |
| 17                | 0,16                  |
| 18                | 0,57                  |

компенсируется также влияние накопленной составляющей погрешности шага винта (см. пп. 3.2 и 5.2). Местная погрешность шага винта при этом не компенсируется, что требует назначения на нее жестких допусков и обязательной индивидуальной проверки метрических винтов [40].

Из формулы для  $\Delta y_{\Delta p}$  следует, что влияние погрешности шага винта зависит от соотношения  $r_2/r_1$ . Следовательно, если предусмотреть эти параметры не равными друг другу, как в типовом узле, а принять  $r_1 = (2 \div 3) r_2$ , то влияние погрешности шага винта (а также погрешностей  $\Delta h_1$ ,  $\Delta c_0$ ) будет ослаблено в два-три раза. Это позволит существенно повысить технологичность винтовой пары

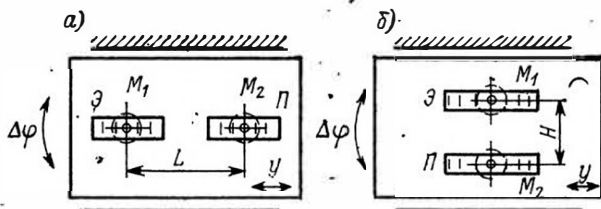


Рис. 1.6. Схема компараторов:

Э, П — эталонная и поверяемая шкалы;  $M_1$  и  $M_2$  — отсчетные микроскопы

благодаря расширению допуска на погрешности ее изготовления и возможности перехода к выборочному контролю. Для обеспечения требуемых характеристик узла изменение соотношений длин плеч рычага приведет к изменению параметров винта (увеличению шага при том же значении  $x$  либо увеличению числа оборотов винта при неизменном значении  $p$ ). Увеличение длины винта, как известно, приводит к некоторому возрастанию накопленной составляющей погрешности его шага. Однако, во-первых, это возрастание незначительно, а во-вторых, накопленная составляющая компенсируется регулировкой размера одного из плеч рычага. Такое перераспределение конструктивных параметров рычага и винта может вызвать увеличение габаритных размеров устройства. Рациональной компоновкой конструкции это можно устранить.

Примером решений, позволяющих существенно снизить влияние погрешности шага винта на точность и чувствительность перемещения, выполняемого с помощью винто-рычажного привода, могут служить механизм тонкой фокусировки микроскопа типа «Винкель» и наводящие устройства теодолитов [11], соотношения длин плеч рычагов в которых равны  $1/3$ — $1/5$ .

Изменения в конструкции приборов могут существенно повысить их качество. На рис. 1.6, а представлена схема компаратора, в конструкции которого соблюдается принцип Аббе, поэтому при повороте стола на угол  $\Delta\varphi$  он обладает погрешностью измерения  $\Delta y_1$  второго порядка малости

$$\Delta y_1 = L 2 \sin^2 \Delta\varphi/2 \approx L\Delta\varphi^2/2,$$

а компаратор, конструкция которого не удовлетворяет принципу Аббе (рис. 1.6, б), имеет погрешность первого порядка

$$\bullet \Delta y_2 = H \sin \Delta \varphi \approx H \Delta \varphi.$$

На рис. 1.7, а изображена схема измерительной автоколлимационной головки, качество изображения и точность работы которой много лучше благодаря изменению конструкции. В автоколлима-

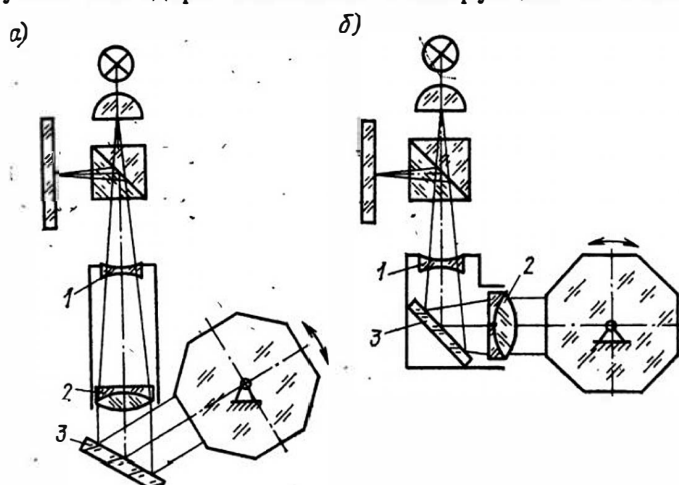


Рис. 1.7. Схемы конструкций измерительной головки

ционной головке прототипа (рис. 1.7, б) погрешность положения зеркала 3, стоящего между линзами телеобъектива, приводит к коме и другим aberrациям. Погрешность положения зеркала 3 (рис. 1.7, а), стоящего в параллельном пучке лучей телеобъектива 1, 2, практи-

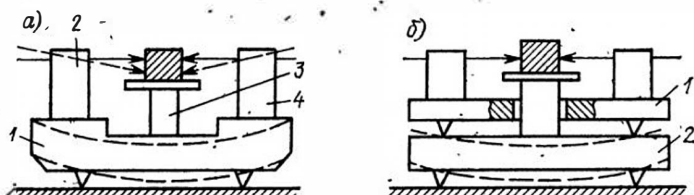


Рис. 1.8. Основания горизонтальных длиномеров моделей ИКУ-2 (а) и ИЗГ-4 (б)

чески никакого влияния на качество изображения не оказывает, здесь также существенно снижена трудоемкость юстировки. Еще одним примером является сравнение конструкций оснований горизонтальных длиномеров ИКУ-2 и ИЗГ-4 (рис. 1.8, а, б). В длиномере ИКУ-2 основание 1 является несущим элементом пинольной бабки 2, предметного стола 3 и измерительной бабки 4. Под действием веса измеряемого объекта возникает прогиб основания, приводящий к погрешности измерения до 1 мкм. В длиномере ИЗГ-4

основание 1, несущее измерительные бабки, разгружено от предметного стола, и прогиб нижнего основания 2 прибора под действием веса объекта мало сказывается на точности измерения (погрешность достигает 0,2 мкм при максимальной нагрузке).

Изменением схемы устройства можно повысить качество прибора. На рис. 1.9, а, б приведены схемы винтового и спирального окулярных микрометров. Спиральный микрометр обладает теми же техническими возможностями, что и винтовой, однако благодаря замене поступательного движения подвижной сетки 1, осуществляемого винтовым отсчетным механизмом 2, вращательным движением

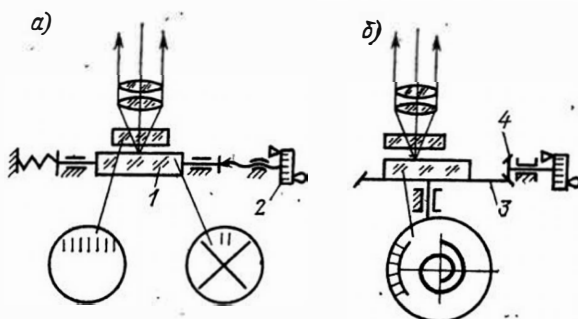


Рис. 1.9. Схема винтового (а) и спирального (б) окулярного микрометров

сетки со спиральной и линейной шкалами, имеет меньшую погрешность измерения. Изменение схемы микрометра уменьшило длину отсчетной кинематической цепи, что привело к повышению его точ-

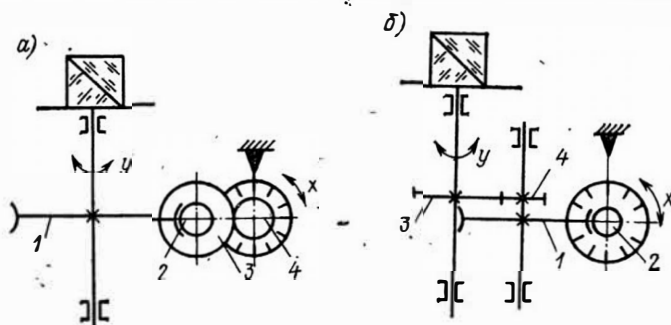


Рис. 1.10. Схемы отсчетного привода

ности (коническая зубчатая передача 3, 4 является приводом и не оказывает влияния на точность прибора).

На рис. 1.10, а, б представлены две схемы отсчетных приводов приборов, окончательного варианта и первоначального. Оба привода состоят из одинаковых червячных 1, 2 и зубчатых 3, 4 пар, но переставленных местами. Червячные пары имеют передаточные отношения  $i = 1 : 120$ , зубчатые —  $i = 1 : 3$ . Максимальную по-



грешность угла поворота призмы с помощью привода, изображенного на рис. 1.10, а, определим из выражения

$$\Delta y_{\max}^I = \Delta y_1 + \Delta y_2/120 + \Delta y_3/120 + \Delta y_4/360,$$

где  $\Delta y_1$ ,  $\Delta y_2$ ,  $\Delta y_3$ ,  $\Delta y_4$  — кинематические погрешности червячного колеса, червяка, зубчатого колеса 3 и зубчатого колеса 4 соответственно.

Максимальная погрешность другого привода (рис. 1.10, б) составит

$$\Delta y_{\max}^{II} = \Delta y_3 + \Delta y_4/3 + \Delta y_1/3 + \Delta y_2/360.$$

Если для упрощения вычислений примем, что  $\Delta y_1 \approx \Delta y_2 \approx \Delta y_3 \approx \Delta y_4$ , получим

$$\Delta y_{\max}^I / \Delta y_{\max}^{II} \approx 1/1,6.$$

Таким образом, изменение схемы привода прибора позволило повысить точность его работы примерно в 1,6 раза.

Значительного повышения качества прибора удается достичь путем *изменения принципа* функционирования прибора. В качестве примера приведем светодальномер, измеряющий дистанцию более быстро и точно, чем обычно применяемые монокулярные и стереоскопические оптические дальномеры.

Измерение дистанции оптическими дальномерами основано на решении параллактического треугольника  $O_1O_2Ц$  (рис. 1.11). Главной причиной погрешности измерения дистанции является погрешность измерения параллактического угла  $E$ .

Погрешность измерения дистанции  $D$  из-за погрешности измерения параллактического угла  $E$  для дальномера с базой  $B$  равна

$$\Delta D_{\Delta E} = -B \Delta E / E^2 = -D^2 \Delta E / B.$$

Погрешность измерения параллактического угла зависит не только от технологических и эксплуатационных погрешностей дальномера, но и от погрешности, обусловленной ограниченной остротой зрения оператора. Эта погрешность, например, при стереоскопическом способе наблюдения составляет около  $10''$  и вызывает так называемую теоретическую ошибку дальномера, равную

$$\Delta E_T = 10''/\Gamma,$$

где  $\Gamma$  — увеличение дальномера.

Погрешность измерения дистанций из-за теоретической ошибки дальномера достигает существенных значений. Например, при  $D = 6000$  м,  $B = 1$  м и  $\Gamma = 10 \times \Delta D_{\Delta E_T} = (6000)^2 10'' \cdot 5 \cdot 10^{-8} / (1 \times 10^3) \approx 180$  м. Измерение дистанции светодальномером основано на измерении времени прохождения ( $t$ ) излучения от дальномера до объекта наблюдения:  $D = Ct/(2n)$ , где  $C$  — скорость распространения света в вакууме;  $n$  — показатель преломления среды (воздуха).

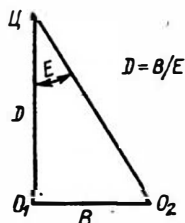


Рис. 1.11. Параллактический треугольник

Главная погрешность измерений дистанций возникает из-за погрешности измерения времени ( $t$ ) прохождения сигнала. Современные способы позволяют измерять промежутки времени с точностью около  $10^{-9}$  с. Исходя из этого  $\Delta D_{\Delta t} = C\Delta t/(2n) = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9}/(2 \cdot 1) = 15$  см.

Как видно из расчетов, погрешность измерения дистанций светодальномером не зависит от дистанции и значительно меньше погрешности оптического дальномера. По другим показателям качества (например, производительности измерений) он также превосходит оптический дальномер, однако уступает ему в надежности.

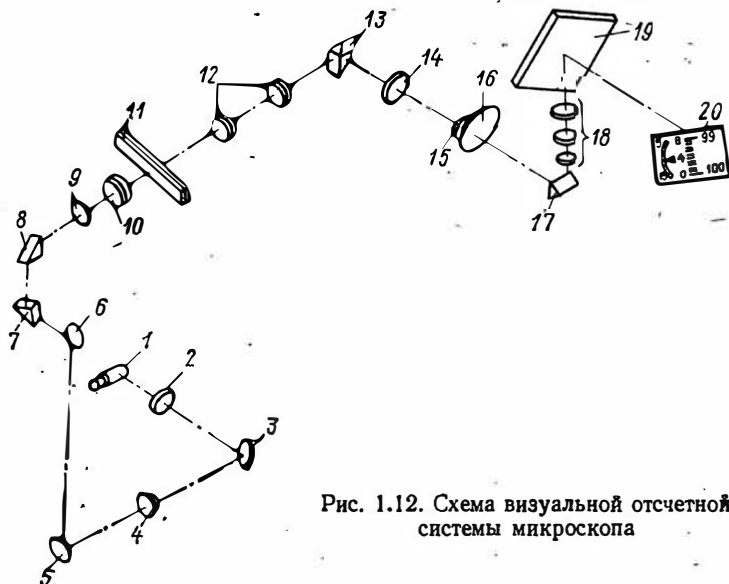


Рис. 1.12. Схема визуальной отсчетной системы микроскопа

Повышение качества прибора не обязательно связано с полным изменением принципа действия, достаточно бывает лишь изменить принцип действия его основных преобразователей. Например, замена визуальных оптических систем отсчета координат перемещения стола и микроскопа в универсальном измерительном микроскопе УИМ-23 на фотоэлектрические системы отсчета координат (микроскоп УИМ-29) позволила повысить производительность измерений в три-четыре раза, улучшить условия работы, существенно уменьшить количество деталей основного производства.

На рис. 1.12 изображена схема отсчетной системы поперечной каретки микроскопа УИМ-23. Она содержит осветительную систему 1—10, эталонную шкалу 11, проекционную систему 12—19 с оптическим микрометром 15, 16 и восковой экран 20. Фотоэлектрический датчик линейных перемещений 1'—7 (рис. 1.13) содержит всего восемь оптических деталей: источник света 1, конденсор 3, клин 5, дифракционные решетки 6, 7 и четыре проекционных линзы 4, строящие изображение на фотоприемниках 2<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> А. с. 508672 (СССР).

Однако следует заметить, что такой путь повышения качества приборов зависит от появления новых изобретений, качественно новых технологических процессов (например, практическая реализация идеи, заложенной в основу работы светодаляномера, стала возможной только при появлении мощных источников излучения — лазеров и чувствительных приемников — ФЭУ).

**Компенсационный метод** повышения качества ОП широко используется на практике. Он основан на применении специальных технологических, организационно-технических и конструкторских мероприятий с целью компенсации влияния погрешностей, ухудшающих

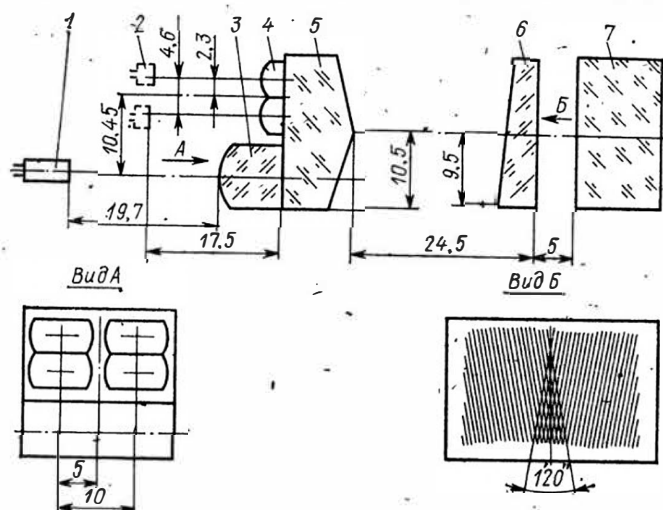


Рис. 1.13. Схема фотоэлектрического датчика линейных перемещений

качество ОП. Этот метод тесно связан как с технологическим (в случае применения технологических методов компенсации), так и с проектным (в случае конструктивных методов компенсации) методами повышения качества ОП.

#### 1.4. МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ

*Технологический метод компенсации* заключается в дополнительной обработке деталей прибора, а также в регулировках и юстировках в процессе сборки ОП с целью компенсации отклонений характеристики материалов деталей и погрешностей их изготовления и сборки.

Дополнительная обработка деталей производится, как правило, в процессе их сборки в узлы и называется пригонкой или доводкой. Доводочные операции могут осуществляться либо на металлорежущих станках (установленных на специальном участке сборочного цеха) либо шабрением, притиркой, разворачиванием. Доводки бы-

вают отдельные, когда каждая деталь подгоняется к эталону (например, с помощью притиров), либо совместные, когда подгоняются друг к другу сопрягаемые детали. Процесс доводки деталей является трудоемким и требует высокой квалификации сборщика.

Регулировки и юстировки осуществляются на завершающем этапе сборки прибора или его узлов путем подвижек деталей, влияющих на качество ОП. Процесс регулировки и юстировки заключается в выявлении погрешностей, подлежащих компенсации (контроль), их устранении и фиксации результата.

При использовании конструктивных компенсаторов, как правило, не обойтись без их регулировок и юстировок (т. е. технологической компенсации). Это говорит о некоторой условности классификации методов. В связи с этим под технологической компенсацией будем понимать главным образом только дополнительную обработку деталей. Данный метод применяется для получения высокой надежности компенсации, а также в тех случаях, когда другие методы использовать невозможно. В остальных случаях экономически выгоднее применять конструктивный или организационно-технический методы компенсации.

Примером применения технологического метода может служить доводка направляющих подвижных систем универсального и биологического микроскопов, подрезка оправ линз в объективах для фокусировки, регулировки фокусного расстояния или компенсации сферических аберраций, а также притирка и прикатка ходовых винтов, зубчатых колес приводов ОП.

*Организационно-технический метод компенсации* заключается в селекции деталей, введении поправок, рандомизации погрешностей, пересчете оптической системы прибора на плавки стекол (пересчете для исправления аберраций по фактическим значениям показателя преломления и средней дисперсии партии стекла с дальнейшей комплектацией деталей по толщинам и воздушным промежуткам).

Рассмотрим пример применения селекции объективов и окуляров бинокля для обеспечения параллельности между собой осей пучков лучей, выходящих из окуляров. Непараллельность осей возникает, в частности, из-за неравенства увеличений в трубках бинокля (рис. 1.14) и равна  $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = \omega(\Gamma_1 - \Gamma_2) = \omega\Delta\Gamma$ . Допуск на непараллельность пучков лучей не превышает (в вертикальной плоскости)  $15'$ . Отсюда определим допуск на относительную разность увеличений в трубках  $\Delta\Gamma/\Gamma = \Delta\alpha/\Gamma\omega = \Delta\alpha/\omega_{\text{ок}} = 15'/25^\circ = 1\%$ . Увеличение в трубках:  $\Gamma_1 = f'_{\text{об1}}/f'_{\text{ок1}}$ ;  $\Gamma_2 = f'_{\text{об2}}/f'_{\text{ок2}}$ .

Учитывая, что погрешность фокусного расстояния объектива в серийном производстве достигает 1%, а окуляра 2—3%, максимальное значение разности увеличений трубок может достичь следующих значений:

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = \frac{\Delta\Gamma_1}{\Gamma_1} + \frac{\Delta\Gamma_2}{\Gamma_2} = \frac{\Delta f'_{\text{об1}}}{f'_{\text{об1}}} + \frac{\Delta f'_{\text{ок1}}}{f'_{\text{ок1}}} + \frac{\Delta f'_{\text{об2}}}{f'_{\text{об2}}} + \frac{\Delta f'_{\text{ок2}}}{f'_{\text{ок2}}} \approx (6 - 8)\%.$$

Компенсацию этой погрешности производят селекцией объективов и окуляров по фокусным расстояниям, комплектуя их таким

образом, чтобы разность увеличений в трубах не превышала 1 %. Для этого поля рассеяния фокусных расстояний объективов и окуляров относительно их номинальных значений ( $f_{об. ном}$ ,  $f_{ок. ном}$ ) разделяют на несколько диапазонов (групп), а затем, измеряя фактические значения их фокусных расстояний, осуществляют комплектацию по группам (рис. 1.15). Число комплектующих групп будет зависеть от величины поля рассеивания, определяемой максимальными ( $f_{об. max}$ ,  $f_{ок. max}$ ) и минимальными ( $f_{об. min}$ ,  $f_{ок. min}$ ) значениями погрешностей фокусных расстояний.

Примером селективной сборки может служить также комплектация револьверных головок микрообъективами в биологических

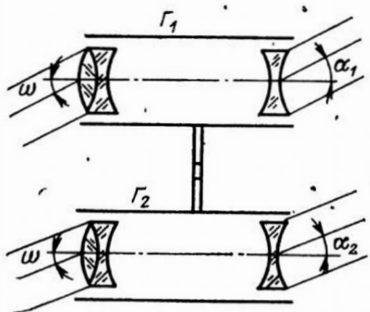


Рис. 1.14. Функциональная схема бинокля

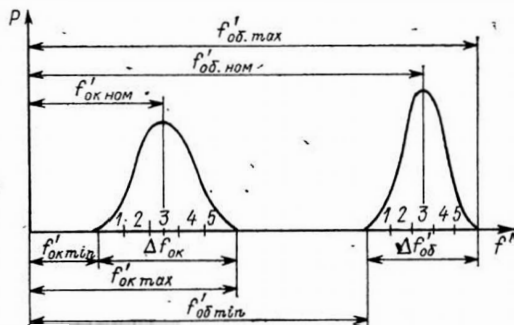


Рис. 1.15. Схема разбиения полей рассеяния фокусных расстояний объектива и окуляра на группы

микроскопах. Погрешности изготовления и сборки револьверных головок и микрообъективов могут привести к тому, что при переключении объективов изображение предмета уйдет из поля зрения. Компенсация неблагоприятного сочетания погрешностей осуществляется подбором к револьверу такого комплекта микрообъективов, чтобы при любом сочетании гнезд револьвера и объективов изображение предмета не смещалось более чем на допуск (в том случае, когда не удастся подобрать объективы, применяют технологическую компенсацию погрешностей револьвера).

Планируя компенсацию погрешностей селекцией деталей, следует отдать предпочтение организованной селекции по сравнению с неорганизованной. При неорганизованной селекции (метод подбора) оптик или сборщик-механик выбирает из партии деталей, поступающих на сборку, такие, которые дают нужное сочетание параметров (нужные посадку, толщину, длину). Характерным примером неорганизованной селекции является комплектация линз по толщине перед склейкой для взаимокompенсации погрешностей их толщин.

При организованной селекции детали с помощью специальных калибров сортируют по группам размеров до поступления на сборку.

Организованная селекция считается более перспективной и технологичной, чем неорганизованная (особенно при крупносерийном

и массовом производстве), которая является более трудоемкой и результат ее зависит от квалификации сборщика.

Несмотря на некоторые недостатки метода селекции (возможность незавершенного производства, дополнительные затраты на сортировку, нарушение принципа полной взаимозаменяемости) он позволяет компенсировать неблагоприятные сочетания погрешностей изготовления деталей и расширить допуски на точность изготовления их размеров.

Организационно-технический метод может быть применен, например, для компенсации влияния погрешности изготовления лимба углоизмерительного прибора типа теодолита (рис. 1.16, а). Погреш-

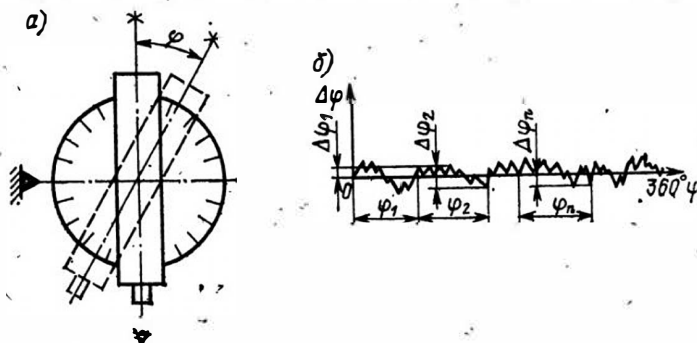


Рис. 1.16. Схема теодолита (а) и график погрешности измерения угла теодолитом (б)

ность изготовления лимба ( $\Delta\varphi$ ), случайная по своей природе и носящая нерегулярный характер, в конкретном углоизмерительном приборе будет вызывать систематическую погрешность при измерении некоторого угла  $\varphi$  (рис. 1.16, б). Для компенсации этой погрешности в результате измерения можно ввести поправку, учитывающую погрешность лимба на данном диапазоне, либо произвести измерения угла на различных участках лимба ( $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ), которым соответствуют погрешности  $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \dots, \Delta\varphi_n$ . Это позволит перевести систематическую погрешность лимба в случайную (рандомизация погрешностей) и обеспечит повышение точности результата измерения, равное примерно значению корня квадратного из числа измерений.

Увеличение числа повторных измерений одной и той же величины позволяет, как известно, уменьшить случайную погрешность результата измерений. Это используют для компенсации погрешностей наведения, считывания, погрешностей, обусловленных нестабильностью трения, рефракциями воздушных слоев и вибрациями. Например, при наведении биштриха оптического микрометра на изображения штриха проектируемой шкалы оператор вследствие ограниченности остроты зрения выполняет эту наводку с погрешностью. Известно, что средняя квадратическая погрешность совмещения ( $\sigma_y$ ) штриха с биштрихом составляет примерно  $6-8''$  (в линейной мере  $8-10$  мкм). Следовательно, предельная вероятная погрешность

положения изображения штриха шкалы относительно биштриха при одиночном наведении может достигать значений  $\delta y' = 3\sigma_y = 18 \div 24''$  (в линейной мере — 24—30 мкм). Для микроскопа УИМ-23, упрощенная схема которого приведена на рис. 1.17, это приводит к предельной погрешности положения стола 1:  $\delta y_n = \delta y' / \beta \approx 30/63 \approx 0,5$  мкм, где  $\beta$  — увеличение проекционной системы.

При многократных повторных совмещениях погрешность положения стола может быть уменьшена до значения корня квадратного из числа повторных совмещений  $\delta y_n = \delta y' / (\beta \sqrt{n})$ , где  $n$  — число повторных измерений.

Для компенсации влияния некоторых погрешностей применяют также чисто организационные методы. Например, для компенсации

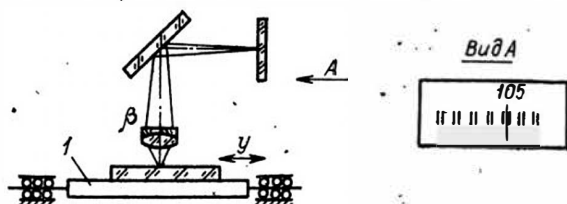


Рис. 1.17. Схема отсчетной системы

погрешности от мертвого хода рекомендуется производить отсчетные перемещения подвижных систем прибора всегда с одной стороны. Подобным же образом можно уменьшить влияние рефракций воздушных слоев, оказывающих существенное влияние на погрешность функционирования углоизмерительных и других приборов (телескопы, теодолиты, нивелиры, автоколлиматоры и т. п.). Из-за рефракций происходят искривления визирных осей приборов, приводящие к погрешностям измерения и наведения.

Уменьшить влияние рефракции можно, если изолировать воздушный тракт от объекта до прибора, устранить источник теплового излучения на пути оптического пучка лучей, расположить прибор выше над землей и работать в определенное время суток, когда рефракция незначительна.

К организационно-техническим методам компенсации следует, видимо, отнести и такие мероприятия как создание в помещениях, в которых эксплуатируются прецизионные приборы и оборудование, постоянной температуры, давления, влажности, а также отсутствие сквозняков, вибраций, пыли и т. п.

Конструктивные методы компенсации осуществляются с помощью ступенчатых компенсаторов, регулировочных устройств, силового замыкания, применения малорасстраивающихся систем, устройств стабилизации и корректировки.

Ступенчатые компенсаторы — это детали, изменением размеров которых добиваются компенсации технологических и других погрешностей приборов. Изменение размеров компенсатора (скачкообразное, неплавное) происходит при их замене либо при дополнительной

технологической обработке. На рис. 1.18, а представлен компенсатор (кольцо)  $K$ , заменой либо подрезкой которого добиваются фокусировки объектива. На рис. 1.18, б компенсационная прокладка  $K$  позволяет регулировать зазор в оси вращения, а на рис. 1.18, в — боковой зазор в зацеплении.

При проектировании этих компенсаторов следует определить их размер и чувствительность, с которой надо изменять этот размер

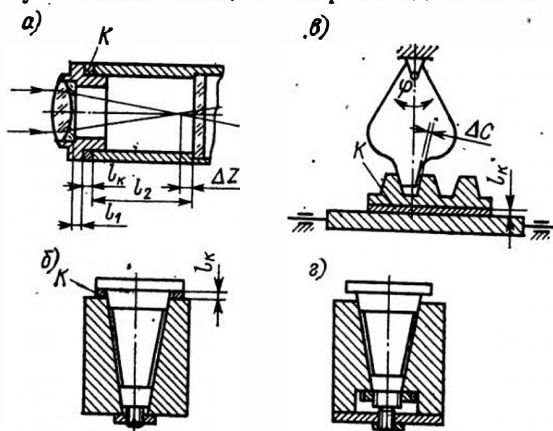


Рис. 1.18. Примеры использования простейших конструктивных компенсаторов

(подбором или подрезкой). Размер определяют расчетом погрешности размерной цепи (для кольца  $K$  (рис. 1.18, а) — погрешностями  $l_1$ ,  $l_2$  и  $S_F'$  объектива). Чувствительность определяется из допустимых показателей качества узла или прибора. Чувствительность изменения

толщины кольца определяется либо чувствительностью глаза к продольным наводкам  $\Delta z \approx 0,2/\sigma_A'$  либо допустимым параллаксом ( $v$ ):  $\Delta z = f'_{ок} \Gamma v / f_{max}$ , где  $f'_{ок}$  — фокусное расстояние окуляра;  $t$  — смещение глаза;  $\Gamma$  — увеличение трубы.

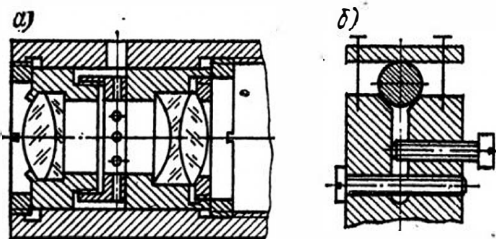


Рис. 1.19. Регулирующие устройства

кладки  $K$  (рис. 1.18, в) определяется исходя из допустимого значения мертвого хода ( $\Delta v$ ):  $\Delta l_K = m z \Delta v / (4 \operatorname{tg} \alpha)$ , где  $z$  — число зубьев колеса;  $m$  — модуль зацепления;  $\alpha$  — угол зацепления.

Регулирующие устройства в отличие от ступенчатых компенсаторов позволяют плавно изменять размеры и положения деталей и узлов, подвижкой которых обеспечивается требуемое качество.

На рис. 1.18, г изображено устройство для плавного регулирования зазора в опоре. Устройство для фокусировки объектива



и регулировки его фокусного расстояния изображено на рис. 1.19, а, на рис. 1.19, б — для регулирования горизонтальной оси вращения теодолита.

К регулировочным устройствам относятся простые конструктивные решения (без введения дополнительных деталей), например, соединение оправы объектива с корпусом по резьбе для обеспечения плавной фокусировки (рис. 1.20, а), а также сложные, состоящие из нескольких деталей. На рис. 1.20, б изображена схема компенсации накопленной погрешности шага винта и фокусного расстояния линзы в дальнометре, что достигается разворотом винта относи-

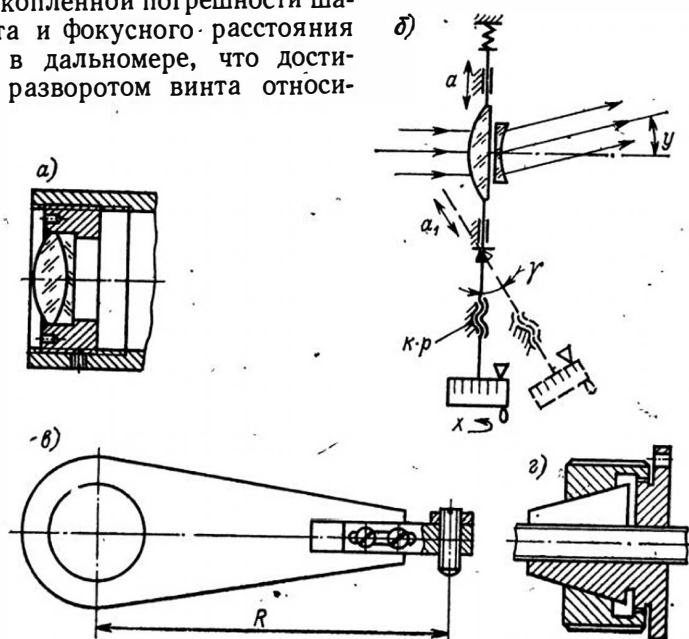


Рис. 1.20. Юстировочные компенсаторы

тельно направляющих каретки подвижной линзы на некоторый угол  $\gamma$ . При этом создается коррекция

$$\Delta y_k = -\frac{kp}{f'2\pi}x + \frac{kp}{f'2\pi}x \cos \gamma = -\frac{kp}{f'2\pi}(1 - \cos \gamma)x,$$

где  $k, p$  — число заходов и шаг резьбы винтового механизма;  $f'$  — фокусное расстояние подвижной линзы.

На рис. 1.20, в представлен компенсатор погрешности изготовления длины рычага привода столика монохроматора. Разрезная регулировочная гайка позволяет уменьшить погрешность от зазора в паре винт—гайка (рис. 1.20, г).

На рис. 1.21 изображен в разрезе объектив бинокля в эксцентриковой оправе, разворотом которой компенсируются погрешности, приводящие к непараллельности осей пучков лучей, выходящих из окуляров трубок.

Силовое замыкание позволяет компенсировать погрешности изготовления и сборки, а также некоторые эксплуатационные факторы (например, зубчатое зацепление с устранением влияния бокового зазора (рис. 1.22, а) с помощью пружин, установленных на разрезном колесе).

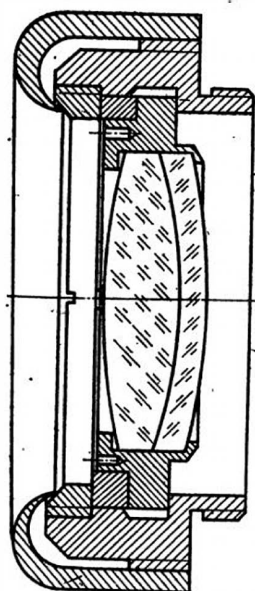


Рис. 1.21. Объектив в двойной эксцентриковой оправе

Пружинный подпятник (рис. 1.22, б) автоматически выбирает зазоры, предохраняет оси от поломки в условиях тряски и вибраций, компенсирует температурные колебания размеров. Пружинное кольцо компенсирует возможное пережатие объектива при сборке и

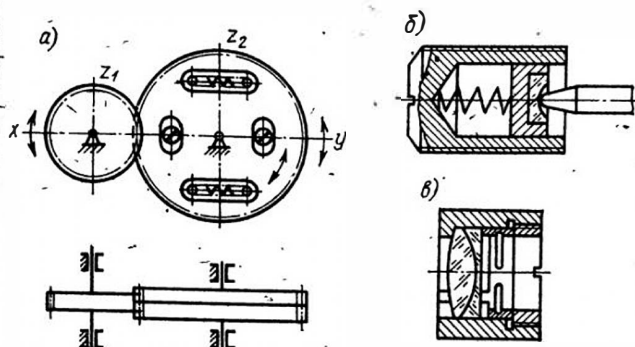


Рис. 1.22. Компенсаторы погрешностей на основе силового замыкания

колебания температуры в процессе эксплуатации прибора (рис. 1.22, в).

Одним из эффективных методов компенсации погрешностей, ухудшающих качество ОП, является применение малорасстраивающихся систем.



Рис. 1.23. Схемы биаксиальных коллиматоров

На рис. 1.23 приведены схемы биаксиальных коллиматоров оптических дальномеров. Смещение одной из линз относительно другой (рис. 1.23, а) при сборке или эксплуатации приборов не приводит к непараллельности визирных осей коллиматора (углы  $\omega_1$  и  $\omega_2$  равны). Во втором случае не возникает расстройки биаксиального коллиматора (рис. 1.23, б) при смещении линз, наклоне зеркала, а также не требуется точного равенства фокусных отрезков линз.

К малорасстраивающимся системам следует отнести также и оптическую линейку ИС-36, приведенную на рис. 1.24. Действие ли-

нейки основано на свойстве афокальной телескопической системы создавать масштаб изображения постоянным и равным единице независимо от положения сопрягаемых поверхностей (задний фокус одного из объективов  $O_1$  совпадает с передним фокусом другого объектива  $O_2$ ), а также быть малочувствительной к погрешности фокусных расстояний компонентов и несовпадению фокусов.

Еще одним примером может быть фокусный уровень авиационного секстанта ИАС-1, позволяющего устойчивую вертикаль при

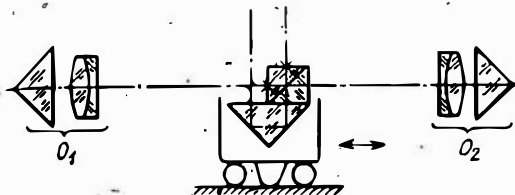


Рис. 1.24. Схема узла оптической линейки

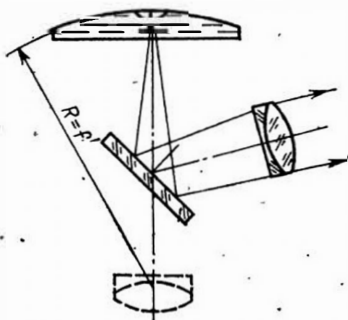


Рис. 1.25. Схема фокусного уровня авиасекстанта

инструмента (рис. 1.25). «Нерасстраиваемость» вертикали получается здесь благодаря тому, что радиус  $R$  кривизны уровня равен фокусному расстоянию  $f'$  объектива.

Широкое распространение получили также устройства стабилизации и автоматической коррекции. Примером могут служить ком-

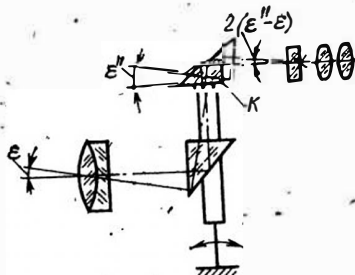


Рис. 1.26. Схема нивелира с самоустанавливающейся линией визирования

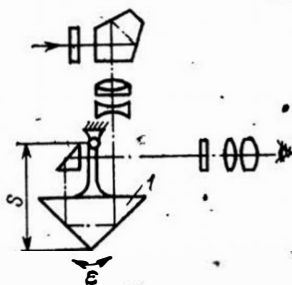


Рис. 1.27. Схема нивелира с компенсатором

пенсаторы наклонов нивелиров в нивелирах с самоустанавливающейся линией визирования.

На рис. 1.26 изображена схема такого нивелира фирмы «Эртель» (Ertel). При наклонах нивелира на угол  $\epsilon$  отклоняется компенсационная призма  $K$  (на угол  $\epsilon''$ ), установленная на плоском пружинном шарнире, в результате чего в пространстве предметов линия визирования остается горизонтальной. На рис. 1.27 изображена схема нивелира «Кони 007» (Koni 007) фирмы «Карл Цейс» (Carl Zeiss).

При наклоне данного нивелира на угол  $\epsilon$  компенсационная призма  $1$ , свободно подвешенная на пластинке, стабилизирует в гори-

зонте линию визирования. Выражение  $S = 0,5 f_{\infty}$  будет условием стабилизации.

В точном приборостроении широко используют также системы автоматической коррекции погрешностей, возникающих из-за колебания температуры, технологических погрешностей и т. д. Например, температурная компенсация изменения показателя преломления

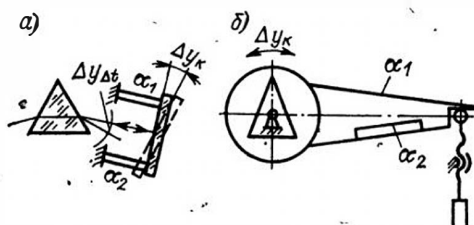


Рис. 1.28. Температурные компенсаторы

пературы. Выражение  $\Delta y_{\Delta t} = -\Delta y_k$  является условием компенсации.

На рис. 1.29 изображена схема коррекционного устройства для устранения влияния эксцентриситета червячного колеса. Здесь

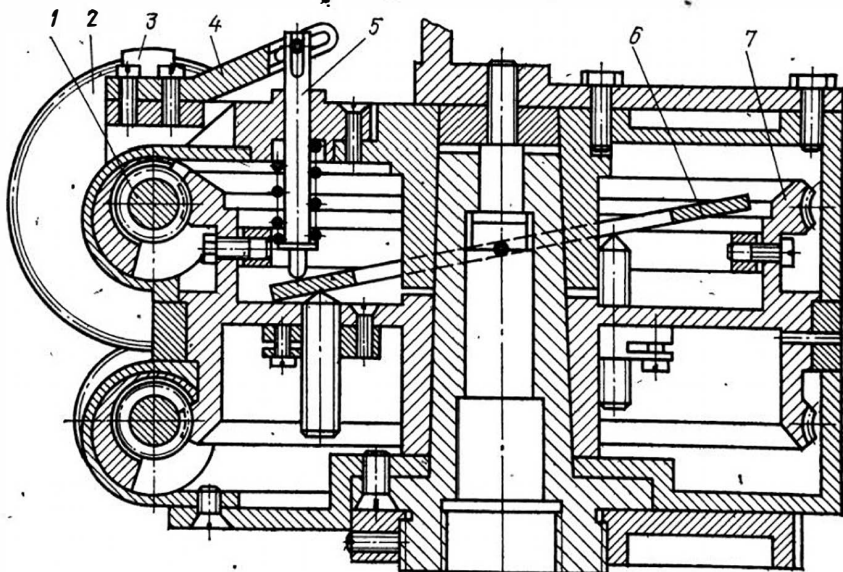


Рис. 1.29. Коррекционное устройство червячной передачи [46]:

1 — червяк; 2 — шкала; 3 — индекс; 4 — рычаг; 5 — толкатель; 6 — коррекционная шайба; 7 — червячное колесо

наклонная шайба 6 через рычажную передачу производит дополнительный разворот индекса 3. В результате червяк поворачивается на дополнительный угол ( $\Delta x_k$ ), осуществляя коррекционный поворот ( $\Delta y_k$ ) колеса:  $\Delta y_k = -\Delta y_{\Delta t} = \kappa \operatorname{tg} \Delta \gamma_k a \sin y/(zr)$ , где  $\kappa$  — чис-

до заходов червяка;  $z$  — число зубьев колеса;  $a$  — расстояние от оси поворота колеса до толкателя;  $r$  — радиус рычага индекса;  $\gamma$  — угол поворота колеса;  $\Delta\gamma_k$  — коррекционный наклон шайбы.

В некоторых случаях коррекционные устройства представляют собой довольно сложные системы.

На рис. 1.30, а представлена принципиальная схема выверителя фокусировки телескопа<sup>1</sup>. Здесь фотоприемник 2 выставлен в первичном фокусе главного зеркала телескопа 9 подвижной

стакана 1 с помощью выверителя фокусировки, содержащем источник света 3, призму — пирамиду 4 с двумя отражающими и одной преломляющей гранью; составной светофильтр 5, половинки которого имеют разный цвет; конденсор — марку 6, штриховая марка которого расположена перпендикулярно к измеряемому направлению; пентаотражатели 7, 14; контрольную зрительную трубу 11; юстировочный двуклиновый компенсатор 8, предназначенный для совмещения изображений штрихов марки 6 при юстировке выверителя. В том случае, когда происходит расфокусировка телескопа (фотоприемник и марка не находятся в фокальной плоскости зеркала) лучи света, отраженные от зеркала в точках А и В будут

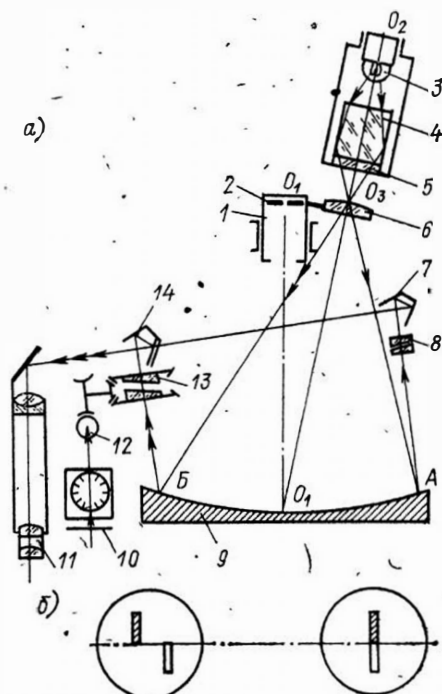


Рис. 1.30. Выверитель фокусировки телескопа

не параллельны друг другу и изображения штрихов марки в поле зрения контрольной трубы (рис. 1.30, б) разойдутся. Знак расфокусировки определяется по взаимному расположению цветных изображений частей штриха.

При использовании в телескопе различных фотоприемников возникает рассогласование положений светочувствительного слоя приемника и плоскости марки 6, что приводит к сбою нуля выверителя фокусировки. Для устранения этого недостатка служит устройство компенсации фокальной разности фотоприемников, содержащее двуклиновый компенсатор 13, привод 12 и шкальное отсчетное устройство 10, шкала которого градуирована с учетом фокальной разности. Нулевой отсчет соответствует совпадению марки выверителя с фокальной плоскостью главного зеркала.

<sup>1</sup> А. с. 263927 (СССР).

Как видно из приведенного примера, в коррекционное устройство могут быть включены компенсаторы для обеспечения его юстировки, настройки и выверки. В данном выверителе, кроме упомянутых компенсаторов 8 и 13, предусмотрены также юстировочные подвижки пентаотражателей, разворот пирамиды вокруг оси  $O_1—O_3$ , смещения источника света.

В последнее время для автоматизации работ ОП все более широкое применение находят ЭВМ, которые могут быть использованы также для коррекции влияния погрешностей приборов. В качестве примера использования ЭВМ для коррекции можно привести компенсацию методических погрешностей функционирования космических

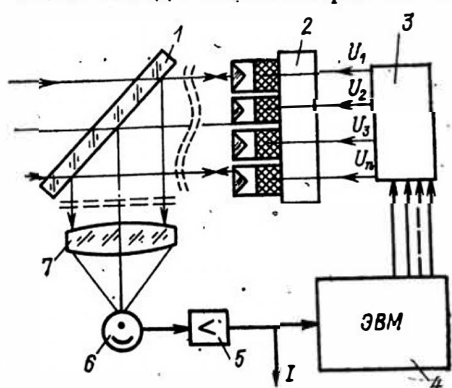


Рис. 1.31. Схема адаптивной системы:

1 — светоделятельное зеркало; 2 — активное гибкое зеркало; 3 — управляемый блок высокого напряжения; 4 — компьютер; 5 — усилитель; 6 — фотоприемник; 7 — объектив

секстантов с помощью бортовых ЭВМ космических кораблей<sup>1</sup>. В разработанном окулярном микрометре с фотоэлектрической отсчетной системой координат случайная погрешность наведения на объект, выполняемая оператором, уменьшается повторными совмещениями, причем результат измерений обрабатывается на микро-ЭВМ, встроенной в регистрационный блок.

Благодаря применению ЭВМ стало возможным компенсировать влияние некоторых случайных погрешностей, которые считались ранее некомпенсируемыми. Это привело, в част-

ности, к развитию отдельного направления в оптике: к созданию так называемой адаптивной оптики, содержащей активный элемент (управляемый ЭВМ) для компенсации влияния турбулентности и рефракций воздушных слоев на качество изображения, создаваемого оптической системой, и других эксплуатационных и технологических погрешностей системы [1]. Одна из таких систем, используемая для коррекции влияния турбулентности воздушной атмосферы, изображена на рис. 1.31 [59]. Коррекция искаженного турбулентностью атмосферы волнового фронта происходит здесь благодаря управляемому «гибкому» зеркалу, состоящему из  $n$  триппель призм, установленных на пьезоэлектрических колонках. При подаче электрического напряжения  $U_1—U_n$  на пьезоколонки последние изменяют свой размер, перемещают триппель призмы, компенсируя тем самым искажения волнового фронта. Управление необходимым перемещением призм осуществляется компьютером с логическим устройством и анализатором сигнала с фотоприемника.

<sup>1</sup> Основы проектирования космических секстантов А. Г. Николаев, И. А. Забелина, Н. Ф. Романтеев и др. М.: Машиностроение, 1978. 216 с.

Все перечисленные компенсаторы погрешностей могут быть классифицированы еще и по их типам.

В зависимости от вида компенсируемых погрешностей и месту регулировки (изменению параметров) компенсаторы можно подразделить на регулировочно-юстировочные, функциональные, настроечно-выверочные.

Регулировочно-юстировочные компенсаторы предназначены для компенсации погрешностей отдельных деталей и размерных цепей, их параметры изменяются при выполнении регулировок и юстировок прибора. (Например, кольца для фокусировки объективов, прокладки для регулировки зазоров в кинематических парах, доводка направляющих, регулировочные устройства для центровки объективов и зеркально-призменных систем).

Функциональные компенсаторы предназначены для компенсации переменных погрешностей функциональных преобразователей прибора, их параметры изменяются при эксплуатации прибора. Примером такого типа компенсаторов могут служить коррекционные устройства, температурные компенсаторы, устройства стабилизации линии визирования, адаптивные компенсаторы.

Настроечно-выверочные компенсаторы предназначены для компенсации погрешностей ориентации прибора, износа, расстройки. Параметры этих компенсаторов изменяются в процессе настройки и выверки прибора. К компенсаторам данного типа относятся устройства для выверки оптических дальномеров по высоте и дальности, устройства выверки теодолита в полевых условиях для устранения наклона вертикальной и горизонтальной осей вращения и коллимационной ошибки, регулировочные устройства, предназначенные для компенсации износа направляющих и для компенсации изменения моментов и сил на рукоятках управления.

### **1.5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА МЕТОДА КОМПЕНСАЦИИ**

При компенсации погрешностей возникает вопрос выбора метода компенсации. От правильности его решения зависит эффективность данного способа обеспечения показателей качества ОП. Рассматривая компенсаторы как подсистему прибора, следует их свойства также оценивать некоторыми показателями качества, характеризующими их точность, экономичность (технологичность), надежность, пределы работы. Кроме того, при выборе того или иного метода компенсации следует руководствоваться возможностью его применения, которая обусловлена, с одной стороны, видом и характером компенсируемой погрешности, а с другой, — условиями производства. Например, невозможно компенсировать погрешности теоретические, эксплуатационные (рефракцию воздуха, деформации) технологическим методом, но можно компенсировать их конструктивным и организационно-техническим методами. Если выбирается конструктивный компенсатор (например, для компенсации периодической погрешности), то невозможно применение ступенчатого

компенсатора, следует применить коррекционное устройство, создающее периодическую погрешность (коррекцию) обратного знака.

Точность компенсатора определяется остаточной компенсируемой погрешностью либо остаточным значением компенсируемого показателя качества. Например, остаточная погрешность фокусного расстояния телеобъектива (компенсируемая подвижкой одного компонента относительно другого) определяется в основном погрешностью измерения его фокусного расстояния. Остаточная непараллельность выходных осей пучков лучей бинокля, обусловленная разностью увеличения трубок, определяется полями рассеяния значений фокусных расстояний объективов и окуляров в пределах своих групп при селекции (см. рис. 1.15). Остаточное значение бокового зазора пары рейка—зубчатое колесо, компенсируемого ступенчатым компенсатором (см. рис. 1.18, в) будет определяться не только возможностями изменения толщины прокладки, но главным образом эксцентриситетом колеса (фактором, который не позволяет при такой компенсации полностью избавиться от бокового зазора). Если же применить для компенсации разрезное колесо (см. рис. 1.22, а) или силовое замыкание, то боковой зазор будет компенсирован полностью.

Экономичность (технологичность) компенсатора определяется затратами на выполнение той или иной компенсации. Иногда экономичность одного метода по отношению к другим можно определить достаточно просто (на качественном уровне). Например при крупносерийном производстве приборов конструктивный метод компенсации предпочтителен перед технологическим. Организованная селекция деталей перед сборкой экономичней неорганизованной селекции, когда ее делает квалифицированный рабочий. Среди конструкторских методов компенсации следует отдавать предпочтение тем, которые требуют меньшего количества юстировок. Например компенсация зазоров в направляющих с помощью силового замыкания, как правило, технологичней компенсации их регулировкой. В других случаях экономичность того или иного метода компенсации определить не просто, так как она зависит от большого количества факторов: серийности прибора, технологической оснащенности производства, квалификации рабочих, стоимости и дефицитности материалов, конъюнктуры рынка и т. п.

Под надежностью компенсатора понимают его свойство сохранять работоспособность (т. е. заданные функции с параметрами, удовлетворяющими предъявляемым требованиям) в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки прибора.

Надежность компенсатора обуславливается его безотказностью (свойство сохранять работоспособность в течение некоторой наработки без вынужденных перерывов), ремонтпригодностью (свойство к предупреждению, обнаружению и устранению отказов путем проведения технического обслуживания и ремонтов), сохраняемостью (свойство сохранять параметры неизменными при определенных условиях и сроках хранения и транспортировки прибора), долговечностью (способность к длительной эксплуатации при необ-



ходимом техническом обслуживании). Оценка надежности того или иного метода компенсации часто является сложной задачей, так как по одним показателям надежности следует отдать предпочтение одному компенсатору, а по другим показателям — другому. Однако и здесь некоторым компенсаторам можно отдать предпочтение без вычислений их показателей надежности, на основании накопленного практического опыта. Известно, например, что компенсация погрешностей неподвижных систем прибора (погрешностей положения зеркал, призм, объективов и т. д.) дополнительной обработкой деталей (припиловкой, шабрением, доводкой) и использованием ступенчатых компенсаторов более надежна, чем регулировочными устройствами. И наоборот, для некоторых подвижных систем при наличии износа следует отдать предпочтение регулировочным устройствам (которые могут быть подналажены в процессе эксплуатации) по сравнению с технологическими методами компенсации.

Пределы работы компенсатора характеризуются величиной создаваемой им коррекции для компенсации максимально возможного значения погрешности (погрешностей) либо ее (их) частичного влияния. Не всегда пределов работы компенсатора бывает достаточно для полной компенсации погрешностей. Например, если компенсировать непараллельность визирных осей бинокля только смещением объектива или окуляра перпендикулярно оптической оси трубки, то для полной компенсации максимально возможной непараллельности объектив или окуляр придется смещать на такое расстояние, что существенно ухудшится качество изображения [32]. Другим примером служит попытка компенсировать только доводкой (или вращательного) движения направляющих поступательного (или вращательного) движения также погрешность их размеров или расположения, которая может достигать значений до десятых долей миллиметра. Подобные погрешности компенсировать доводкой нецелесообразно.

Рассмотрим, как перечисленные выше критерии позволяют выбрать метод компенсации погрешностей в спектральной щелевой диафрагме типа ГОИ, изготавливаемой небольшими сериями. Кинематическая схема диафрагмы приведена на рис. 1.32. При вращении ( $x$ ) барабаничка перемещается винт 1, воздействующий на ползун 2,

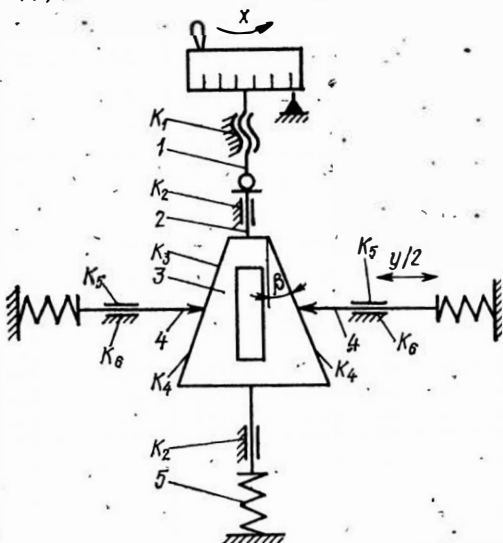


Рис. 1.32. Кинематическая схема щелевой диафрагмы типа ГОИ

на котором закреплен плоский кулачок (клин) 3, замыкающийся на винт с помощью пружины 5. В результате перемещаются толкатели 4, непосредственно связанные с ножами диафрагмы. Анализ схемы (см. п. 2.3) показывает, что для обеспечения заданных требований к точности раскрытия диафрагмы, ее положению и форме (отсутствие клиновидности) требуется компенсация  $K_1$  — зазора в паре винт — гайка,  $K_2$  — зазора в направляющих ползуна,  $K_3$  — погрешности угла клина,  $K_4$  — погрешности формы поверхности клина,  $K_5$  — зазора в направляющих ножей,  $K_6$  — непараллельности кромок ножей.

Компенсация зазора в паре винт — гайка возможна всеми тремя методами: технологическим (притиркой винта и гайки); организационно-техническим (введением поправок, селекцией винтов и гаек, односторонним отсчетным движением винта); конструктивным (регулирующим устройством, силовым замыканием). Все методы, за исключением селекции, обеспечивают требуемую точность: остаточный осевой зазор 2—3 мкм. Селекция винтов и гаек вследствие больших полей рассеяния погрешностей их изготовления, а также из-за малых серий выпускаемых диафрагм может практически не дать требуемой точности компенсаций.

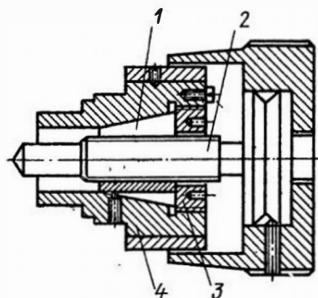


Рис. 1.33. Компенсация зазора в паре винт-гайка

Заметим также, что такой метод для данного случая был бы еще и неэкономичен из-за большой незавершенности производства.

По экономичности технологическая и организационно-техническая компенсация уступают конструктивной: первая — из-за большой трудоемкости подгонки винта и гайки, а введение поправок и одностороннее отсчетное движение — из-за неудобства при эксплуатации (потеря времени, ухудшение комфорта).

Наиболее просто зазор в паре винт — гайка можно было бы компенсировать силовым замыканием, выполнив пружину 5 такой, чтобы она не только замыкала ползун на винт, но и выбирала бы зазор. Такая компенсация, однако, была бы недостаточно надежна, так как непосредственно на винт воздействуют радиальные и осевые силы, создаваемые рукой оператора (различные по значению и знаку).

Для компенсации этих сил пришлось бы создавать очень сильную пружину, что привело бы к увеличению износа пары винт — гайка и погрешностей из-за деформаций и сил трения, т. е. к потере точности и надежности устройства.

Таким образом, наиболее эффективна компенсация с помощью регулирующего устройства. В типовой конструкции щелевой диафрагмы зазор компенсируют с помощью разрезной гайки (рис. 1.33). Разрезную гайку 1 выполняют в виде цанги; конусные части которой обжимают ходовой винт 2 при завинчивании регулирующего кольца 3 в корпус 4.

Компенсация зазора в направляющих ползуна возможна подгонкой ползуна и направляющих, селекцией деталей, конструктивной регулировкой зазора и силовым замыканием. Отказавшись от технологической компенсации по экономическим соображениям, а от селекции еще и из-за недостаточной точности, остановимся на конструктивных методах компенсации. Так как ползун находится по сравнению с винтом в более определенном и стационарном силовом режиме, то применение силового замыкания для компенсации зазора достаточно надежно. В данном случае определение наиболее

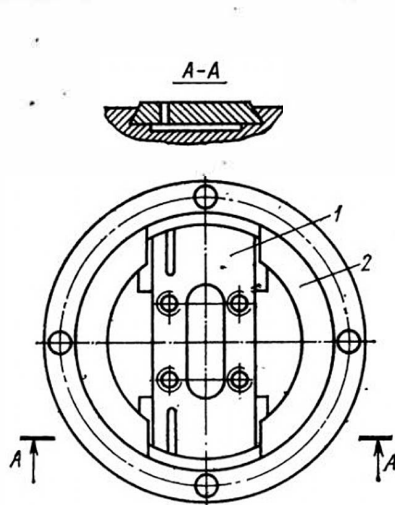


Рис. 1.34. Компенсация зазора в направляющих типа ласточкин хвост

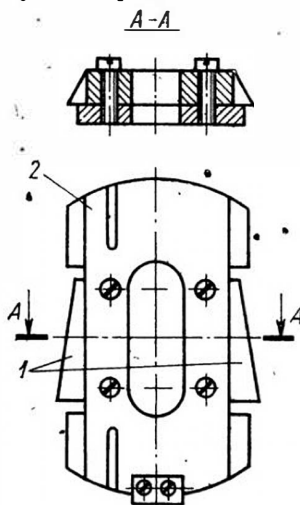


Рис. 1.35. Компенсация погрешности углов клиньев, установленных на ползуне щелевой диафрагмы

выгодного варианта регулировочного устройства или варианта силового замыкания основывается на количественной оценке (т. е. показателях) экономичности. В типовой конструкции применяют комбинированное решение — силовое замыкание с элементами регулировочного устройства (рис. 1.34). Для компенсации зазора между направляющими 2 и ползуном 1 последний изготавливают с двумя сквозными прорезами на концах. Механик при сборке этого узла слегка отгибает концы ползуна, которые работают в соединении с некоторым подпружиниванием.

Погрешность угла клина может быть компенсирована доводкой, введением поправок в отсчет, регулировочным и коррекционным устройствами.

Погрешность угла клина приводит к погрешности раскрытия щели и к смещению ее центра из-за неравенства углов клиньев. Это обстоятельство требует введения не только постоянной поправки в отсчет на раскрытие щели (осуществить это было бы, видимо, несложно), но и поправки, учитывающей смещение, что не позволяет считать этот метод компенсации экономичным.

Применение коррекционного устройства также неэффективно из-за сложности таких устройств. Сравнение технологического метода с регулировочным устройством показывает, что последнее в условиях серийного производства более экономично, хотя в общем случае менее надежно; в лабораторных условиях работы диафрагмы надежность регулировочного устройства достаточно высока.

В типовой конструкции погрешность изготовления углов клиньев компенсируют разворотом клиньев 1 относительно ползуна 2 (рис. 1.35). Для повышения надежности клинья после регулировки можно заштифтовать.

Погрешность формы поверхности клина из-за переменного нерегулярного характера этой ошибки практически можно

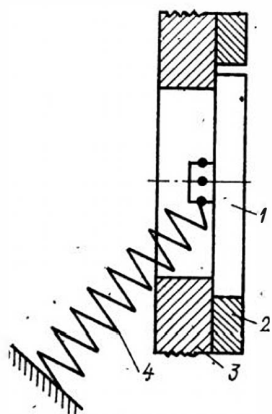


Рис. 1.36. Компенсация зазора между ножом 1 и направляющими 2, 3, пружиной 4

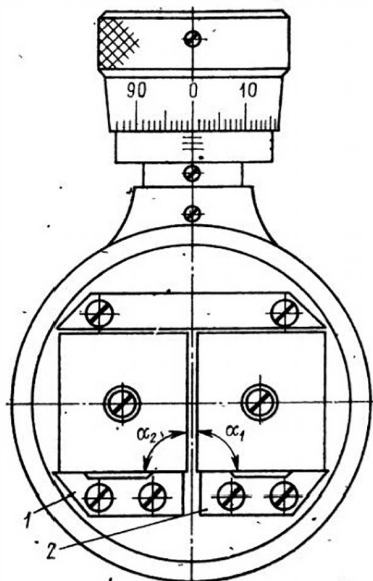


Рис. 1.37. Компенсация непараллельности кромок ножей

компенсировать только технологическим методом: в типовой конструкции ее компенсируют доводкой (полировкой) поверхности клина.

Компенсацию зазора направляющих ножей аналогично компенсации зазора в направляющих ползуна осуществляют наиболее эффективно силовым замыканием или регулировочным устройством. Так как ножи перемещаются в открытых Т-образных направляющих, то в типовой конструкции зазор компенсируют силовым замыканием ножей на направляющие пружиной (рис. 1.36).

Непараллельность кромок ножей, возникающую из-за погрешности прямого угла  $\alpha$  ножей (рис. 1.37), компенсируют технологической доводкой, селекцией деталей, ступенчатым компенсатором и регулировочным устройством.

Технологическая компенсация и селекция деталей (ножей) экономически невыгодны. Последняя, кроме того, не может обеспечить

Таблица 1.2

| Метод компенсации          |                                    | Показатели качества компенсаторов |                     |                 |                 |                   |                                             |
|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------------|---------------------------------------------|
|                            |                                    | Возможность применения            | Точность            | Экономичность   | Надежность      | Предельная работа | Сумма баллов с учетом весового коэффициента |
|                            |                                    |                                   | Весовой коэффициент |                 |                 |                   |                                             |
|                            |                                    |                                   | 0,4                 | 0,3             | 0,2             | 0,1               |                                             |
| Технологический            | Притирка<br>Ретуширование<br>..... | 10<br>0<br>.....                  | 5<br>—<br>.....     | 4<br>—<br>..... | 6<br>—<br>..... | 10<br>—<br>.....  | 14,5<br>—<br>.....                          |
| Организационно-технический | Поправки                           | 10                                | 3                   | 3               | 2               | 10                | 12,6                                        |
|                            | Селекция                           | 10                                | 0—1                 | 1               | 6               | 0                 | 11,5                                        |
|                            | Рандомизация                       | 0                                 | —                   | —               | —               | —                 | 11,9                                        |
|                            | Одностороннее движение<br>.....    | 10<br>.....                       | 4<br>.....          | 6<br>.....      | 3<br>.....      | 10<br>.....       | 14,4<br>.....                               |
| Конструктивный             | Регулировочное устройство          | 10                                | 8                   |                 |                 | 10                | 17,3                                        |
|                            | Силовое замыкание                  | 10                                | 6                   | 10              | 5               | 10                | 16,5                                        |
|                            | Коррекционное устройство<br>.....  | 0<br>.....                        | —                   |                 |                 | —                 | —                                           |

требуемой точности (остаточная клиновидность допускается не более 1 мкм). Экономически невыгодным оказывается применение ступенчатого компенсатора, так как для обеспечения требуемой точности потребовалось бы очень тщательное изменение его размера. В типовой модели параллельность рабочих кромок ножей регулируют разворотом одной из направляющих 1 относительно другой 2 (рис. 1.37).

Рассмотренный пример показал, что при выборе того или иного метода компенсации возможны случаи, когда по одним показателям предпочтение следует отдать одному виду компенсаторов, а по другим — другому. Для поиска оптимального решения в подобных случаях и особенно, когда показатели надежности, точности и экономичности компенсатора не рассчитаны, а оцениваются на основании опыта и здравого смысла, рекомендуют применять матрицу оптимизации решений [45].

Матрицу решений составляют на основании весовых коэффициентов показателей качества и баллов, которыми оценивают показатели того или иного компенсатора.

Весовой коэффициент, принимающий значение от 0 до 1, представляют в зависимости от относительной важности критерия и его влияния на качество ОП, исходя из технических условий и техни-

ческого задания на прибор. Сумма всех весовых коэффициентов равна 1.

Баллами от 0 до 10 оценивают показатели качества компенсатора на основании их расчета; либо исходя из накопленных практических данных, опыта или интуиции разработчика. Минимальный балл — 0 означает невозможность применения, либо невозможность обеспечения требуемого показателя. Вариант, набравший наибольшую сумму баллов, считают наиболее эффективным.

Табл. 1.2 представляет матрицу решений для выбора компенсатора зазора в паре винт — гайка (первого компенсатора рассмотренного примера).

Возможность применения компенсатора целесообразно оценивать двумя баллами: 0 (тогда прочие показатели не рассматриваются и вариант отбрасывается) и 10. Пределы работы можно, но не обязательно оценивать двумя такими же баллами. Здесь балл 0 означает, что диапазон компенсации возможной погрешности(ей) может быть недостаточным и для полной компенсации потребуется применение дополнительных мероприятий.

## Г л а в а 2

### **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА КОМПЕНСАТОРОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ**

Расчет компенсаторов погрешностей заключается в определении необходимого и достаточного для обеспечения требуемых показателей качества ОП числа компенсаторов и требований к их параметрам. От числа компенсаторов в существенной мере зависит технологичность прибора. В условиях крупносерийного производства число компенсаторов стараются уменьшить, компенсируя только те погрешности, которые не позволяют получить требуемое качество прибора. Это объясняется тем, что компенсаторы, как правило, требуют регулировки и юстировки; трудоемкость которых выше трудоемкости точного изготовления деталей при крупносерийном производстве. В условиях мелкосерийного и единичного производства компенсаторы используют также для повышения технологичности некоторых деталей благодаря расширению допусков на погрешности их изготовления. В некоторых случаях компенсаторы применяют для повышения показателей качества, связанных с экономической эффективностью прибора.

От правильного определения требований к компенсаторам, в первую очередь, к точности, пределам работы зависит эффективность их применения. Как число компенсаторов, так и требования к их параметрам зависят от количества, вида и степени влияния первичных погрешностей, а также от заданных значений показателей ка-

чества ОП. В связи с этим расчет компенсаторов представляет собой сложную, многофакторную задачу, решение которой должно основываться на моделях, учитывающих взаимосвязь всех факторов.

## 2.1. КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛИ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Разработка моделей компенсации погрешностей в ОП основана на том, что процесс функционирования прибора и компенсатора представляют как сложную систему, параметры которой в общем случае носят вероятностный характер. Модели процесса компенсации можно рассматривать в виде совокупности понятий, структурных и функциональных схем, уравнений, логических операторов, таблиц и т. д., с помощью которых характеристики состояния системы определяются в зависимости от параметров процесса, входных или выходных сигналов, влияющих внешних воздействий, времени и других факторов. Разработаем концептуальную и математическую модели, позволяющие ответить на вопросы, связанные с числом компенсаторов погрешностей и требований, которые должны быть им предъявлены.

Компенсаторы погрешностей, с помощью которых удастся повысить качество прибора, являются его «лишними» системами. Они требуют производства, юстировки, регулировки и других затрат. Однако специфика ОП такова, что ни один из них не может быть изготовлен без компенсации тех или иных погрешностей. Необходимое и достаточное для обеспечения требуемых показателей качества прибора (или его функционального устройства) число компенсаторов можно определить, если связать функциональной зависимостью погрешности прибора, допустимые значения показателей качества, число компенсаторов и их параметры.

Причинно-следственные связи между этими факторами могут быть выявлены следующей концептуальной моделью: *В том случае, когда заданные показатели качества прибора (или функционального устройства) невозможно или экономически нецелесообразно получить из-за технологических, эксплуатационных и других погрешностей, применяют компенсаторы погрешностей, число которых и требования к ним зависят от параметров прибора, численного значения и вида погрешностей, условий производства и эксплуатации.*

На основании этой модели можно разработать математическую модель, характеризующую количественно в виде функциональных зависимостей выявленные причинно-следственные связи. Для этого вначале определим действие первичных погрешностей и факторов на показатели качества ОП.

Запишем действительную и номинальную (расчетную) функции преобразования сигнала ОП (или функционального устройства) в следующем виде:

$$y = f(x, q_i, q'_i); \quad (2.1)$$

$$y_0 = f_0(x_0, q_{i0}, q'_{i0}), \quad (2.2)$$

где  $y$ ,  $y_0$  — действительное и номинальное значения информативного параметра выходного сигнала прибора (устройства) соответственно;  $x$ ,  $x_0$  — действительное и номинальное значение информативного параметра входного сигнала соответственно;  $q_i$ ,  $q_{i0}$  — действительное и номинальное значения конструктивного параметра прибора;  $q'_i$ ,  $q'_{i0}$  — действительное и номинальное значения влияющих факторов;  $f$ ,  $f_0$  — действительная и номинальная функция, связывающие  $x$  и  $y$ .

В связи с тем что реальная функция преобразования сигнала отличается от номинальной, возникает разность между действительным и номинальным значениями информативного параметра выходного сигнала прибора

$$\Delta y = y - y_0. \quad (2.3)$$

В общем случае  $\Delta y$  представляет собой погрешность функционирования прибора, либо aberrацию оптической системы, либо расфокусировку, перекося или наклон изображения, либо непараллельность визирных осей бинокулярных приборов, т. е. характеристику интересующего нас показателя качества прибора ( $\Delta y$  может быть характеристикой такого показателя, который определяется разностью между его номинальным и реальным свойствами, например, характеристикой точности, качества изображения).

Подставив в выражение (2.3) значения  $y$  и  $y_0$  из выражений (2.1) и (2.2) и разложив в ряд Тейлора действительную функцию преобразования, запишем (оставаясь в рамках линейной зависимости между первичными погрешностями и их частичными влияниями) результат их совместного действия на показатель качества

$$\begin{aligned} \Delta y_{\Sigma} = & (\partial y / \partial x)_0 \Delta x + [f(x, q_{i0}, q'_{i0}) - f_0(x, q_{i0}, q'_{i0})] + \\ & + \sum_i^n (\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i + \sum_l^l (\partial y / \partial q'_i)_0 \Delta q'_i, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где  $\partial y / \partial x$ ,  $\partial y / \partial q$ ,  $\partial y / \partial q'$  — передаточные функции (коэффициенты) первичных погрешностей;  $\Delta x = x - x_0$  — отклонение информативного параметра входного сигнала от его номинального значения (методическая погрешность);  $f(x, q_{i0}, q'_{i0}) - f_0(x, q_{i0}, q'_{i0}) = \Delta y_{\Delta f}$  — теоретическая инструментальная погрешность;  $\Delta q = q - q_0$  — первичная погрешность конструктивного параметра;  $\Delta q' = q' - q'_0$  — изменение влияющего фактора;  $n$  — число первичных погрешностей конструктивных параметров;  $l$  — число влияющих факторов. Индекс «0» означает, что частные производные вычисляют для номинального значения параметров без учета погрешностей.

Поскольку величина  $\Delta x$  может быть обусловлена действием не одного, а нескольких допущений (первичных методических погрешностей),  $\Delta y_{\Delta f}$  — действием разнородных теоретических погреш-



ностей, а величина  $\Delta q'$  действует на показатель качества через  $\Delta q$ , то выражение (2.4) запишем в виде

$$\Delta y_{\Sigma} = \sum_i^m (\partial y / \partial x)_0 \Delta x_i + \sum_i^{\Phi} \Delta y_{\Delta f_i} + \sum_i^n (\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i + \\ + \sum_i^p \left\{ (\partial y / \partial q_i)_0 \sum_j^l (\partial q_i / \partial q_j) \Delta q_j \right\},$$

где  $m$  и  $\Phi$  — число методических и теоретических погрешностей соответственно;  $p$  — число параметров, на которые воздействуют влияющие факторы.

Согласно концептуальной модели компенсаторы погрешностей необходимо применять в том случае, когда  $\Delta y_{\Sigma} > \Delta y_d$ , где  $\Delta y_d$  — допустимое значение показателя качества прибора (функционального устройства). Следовательно, математическая модель, связывающая первичные погрешности, параметры прибора и условия эксплуатации с числом и параметрами компенсатора, может быть представлена следующим соотношением:

$$\sum_i^m (\partial y / \partial x)_0 \Delta x_i + \sum_i^{\Phi} \Delta y_{\Delta f_i} + \sum_i^n (\partial y / \partial q_i)_0 \Delta q_i + \\ + \sum_i^p \left\{ (\partial y / \partial q_i) \sum_j^l (\partial q_i / \partial q_j) \Delta q_j \right\} - \sum_i^r \left\{ \partial y / \partial q_i \sum_j^{\kappa} (\partial q_i / \partial z_{\kappa j}) \Delta z_{\kappa j} \right\} \leq \Delta y_d, \quad (2.5)$$

где  $\kappa$  — число компенсаторов;  $r$  — число параметров, на которые воздействуют компенсаторы;  $\partial q / \partial z_{\kappa}$  — передаточная функция (коэффициент) компенсатора;  $\Delta z_{\kappa}$  — коррекционный сигнал на компенсатор. Величина  $\Delta z_{\kappa}$  в общем случае представляет собой либо изменение параметра компенсатора [например, поворот распорного резьбового кольца между компонентами объектива для регулировки его фокусного расстояния (см. рис. 1.19, а)], либо то непосредственное изменение первичной погрешности (изменение конструктивного параметра прибора), которое осуществляется компенсатором (например, слой материала направляющей, удаляемый при шабрении), либо поправку, вводимую в отсчет.

Последнее слагаемое в выражении (2.5) представляет собой коррекционное воздействие компенсаторов ( $\Delta y_{\kappa\Sigma}$ ) для уменьшения влияния погрешностей прибора на показатель качества до значения, равного (или меньше) допустимому (расчетному) значению. Выражение (2.5) соответствует случаю, когда компенсаторы оказывают влияние посредством изменения конструктивных параметров прибора.

При коррекции непосредственно информативных параметров  $y$  или  $x$  (этот случай встречается весьма редко) последнее слагаемое имеет вид (соответственно для  $y$  и  $x$ ):

$$\Delta y_{\kappa\Sigma} = \sum_j^{\kappa} (\partial y / \partial z_{\kappa j}) \Delta z_{\kappa j}; \quad \Delta y_{\kappa\Sigma} = \partial y / \partial x \sum_j^{\kappa} (\partial x / \partial z_{\kappa j}) \Delta z_{\kappa j}.$$

Количество, вид и передаточные функции погрешностей при разработке того или иного варианта конструкции прибора известны. Однако большинство погрешностей носит случайный характер, поэтому на стадии проектирования их конкретные значения неизвестны, т. е. выражение (2.5) может иметь множество решений, обладающих некоторой вероятностью относительно неизвестных  $\kappa$ ,  $\partial q/\partial z_{\kappa}$  и  $\Delta z_{\kappa}$ .

Так как при проектировании прибора обеспечивается не один показатель качества, зависящий от первичных погрешностей, то общее число компенсаторов в приборе, их передаточную функцию и коррекционные воздействия определяют из решения  $n$  линейных неравенств или уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{1\kappa} - \Delta y_{1\kappa\kappa} &\leq \Delta y_{1d}; \\ \Delta y_{2\kappa} - \Delta y_{2\kappa\kappa} &\leq \Delta y_{2d}; \\ &\dots\dots\dots \\ \Delta y_{n\kappa} - \Delta y_{n\kappa\kappa} &\leq \Delta y_{nd}. \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

Эту систему с учетом того, что первичные погрешности могут носить случайный характер, можно решить численными методами на ЭВМ с помощью процедуры, позволяющей путем итерационных приближений на основе направленного перебора оптимизировать область решений.

В некоторых случаях компенсаторы применяют не только для обеспечения требуемых показателей назначения, но и для расширения допусков на изготовление и сборку элементов прибора, благодаря чему повышается технологичность его изготовления. С учетом того, что стоимость деталей обратно пропорциональна квадратам допусков, число компенсаторов, повышающих технологичность конструкции можно определить из соотношения

$$\sum_i^n C_i/\delta q_i^2 > \sum_i^n C_i/\delta q_i'^2 + \sum_j^{\kappa} R_{\kappa j}, \quad (2.7)$$

где  $C_i/\delta q_i^2 = R_i$  — затраты на обеспечение допуска  $\delta q_i$  ( $C_i$  — коэффициент пропорциональности для выражения погрешности в единицах затрат);  $C_i/\delta q_i'^2 = R_i'$  — затраты на обеспечение расширенного допуска  $\delta q_i' = \delta q_i + \delta q_{\kappa}$  ( $\delta q_{\kappa}$  — увеличение допуска благодаря компенсатору);  $R_{\kappa}$  — затраты на изготовление и юстировку компенсатора;  $n$  — число погрешностей, допуск на которые расширяется;  $\kappa$  — число компенсаторов.

В тех случаях, когда компенсаторы позволяют повысить производительность работы (как, например, в авторедукционных нивелирах) или другие показатели, связанные с экономической эффективностью прибора, их необходимо учитывать при определении числа компенсаторов по формуле (2.7). Неравенство (2.7) целесообразно использовать при нахождении области решения системы уравнений (2.6) относительно неизвестных  $\kappa$ ,  $\Delta z_{\kappa}$ ,  $\partial q/\partial z_{\kappa}$ .

В настоящее время автоматизированный расчет производится только для компенсаторов, обеспечивающих некоторые показатели

качества изображения, создаваемого оптической системой. В остальных случаях из-за недостаточного развития системы автоматизированного проектирования ОП (особенно механических функциональных устройств) и отсутствия элементной базы данных по типовым компенсаторам погрешностей их рассчитывают аналитическим методом. Для аналитического решения уравнений (2.5) и (2.6) следует ввести систему критериев, позволяющих уменьшить их неопределенность.

## 2.2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОМПЕНСАТОРОВ

Необходимость применения компенсаторов для обеспечения требуемых качеств прибора определяется на этапе его проектирования, при выполнении точностных, абберационных и других расчетов [31, 56]. Так как большинство погрешностей прибора являются случайными, то на этапе проектирования мы не можем знать их конкретных значений, поэтому определение числа компенсаторов из выражения (2.5) и требований к ним должно быть основано на вероятностном суммировании случайных погрешностей. Это приводит к тому, что неравенство (2.5) имеет множество решений, обладающих некоторой вероятностью.

Неопределенность решений обусловлена также тем, что для компенсации погрешностей, нарушающих требуемое качество, могут быть выбраны компенсаторы с различными значениями  $\Delta z_k$ ,  $\partial q/\partial z_k$  или  $\partial y/\partial z_k$ . Для уменьшения неопределенности неравенства (2.5) необходимо выполнить следующие условия: 1) неравенство (2.5) превратить в равенство; 2) случайным погрешностям присвоить определенное вероятное значение (такими значениями могут быть, например, их практические предельные вероятные значения, которыми нормируются в общем случае показатели качества прибора); 3) число компенсаторов должно быть минимальным, но достаточным для обеспечения требуемого качества; 4) показатели качества компенсатора должны обеспечивать эффективность его применения.

С учетом этих условий запишем выражение (2.5) в виде

$$\sum_i^{n_c} A q_i \Delta q_i + \sum_i^{n_1} A_{ci} C_{pi} \delta q_i + \sqrt{\sum_i^{n_1} A_{ci}^2 k_{pi}^2 \delta q_i^2 + \sum_i^{n_2} A_{ci}^2 k_{pi}^2 \delta^2 q_i} - \Delta y_{\kappa \Sigma} = \Delta y_{\text{вд}}, \quad (2.8)$$

где  $n_c$  — число частичных влияний (т. е. единичных влияний первичной погрешности или фактора на показатель качества), вызванных систематическими (неслучайными) первичными погрешностями и факторами;  $n_1$ ,  $n_2$  — число частичных влияний, обусловленных случайными погрешностями и факторами, которые имеют и не имеют соответственно систематические составляющие;  $A_q = \partial y/\partial q = A_c A_v$  — передаточная функция (коэффициент) первичной погрешности или фактора ( $A_c$  и  $A_v$ ) — неслучайная и случайная части передаточной

функции соответственно);  $\delta q$  — половина вероятного поля рассеяния случайной первичной погрешности или фактора;  $C_p$ ,  $k_p$  — коэффициенты, зависящие от расположения поля и вида рассеяния первичной погрешности или фактора, а также от их передаточной функции [18];  $\Delta y_{vd}$  — допустимое вероятное значение показателя качества.

Коэффициент  $C_p$  учитывает систематическую составляющую частичного влияния. Для частичных влияний, обусловленных скалярными первичными погрешностями, его определяют по формуле  $C_p = C_q = \Delta_0 q / \delta q + \alpha_q$  [см. формулу (1.2)], а для частичных влияний, обусловленных векторными первичными погрешностями, —

по формуле  $C_p = M(A_v) C_q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A_v d\theta C_q$ , где  $M(A_v)$  — мате-

матическое ожидание случайной части передаточной функции;  $\theta$  — направление векторной первичной погрешности (если  $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ ).

Коэффициент  $k_p$  учитывает отклонение действительного закона рассеяния частичного влияния от закона Гаусса (нормальное распределение). Для частичных влияний, обусловленных скалярными первичными погрешностями, его определяют по формуле  $k_p = k_q = \sigma(\Delta q) / \sigma_0(\Delta q)$ , где  $k_q$  — коэффициент относительного рассеяния первичной погрешности или фактора;  $\sigma(\Delta q)$  — среднеквадратическое отклонение действительного закона распределения;  $\sigma_0(\Delta q)$  — среднеквадратическое отклонение рассеивания, подчиняющееся закону Гаусса. Для частичных влияний, обусловленных векторными первичными погрешностями и факторами [18], коэффициент  $k_p$  находят из выражения  $k_p = \sqrt{\sigma^2(A_v)(k_q^2 + 9C_q^2) + M^2(A_v)k_q^2}$ , где  $\sigma^2(A_v) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} A_v d\theta$ .

Очевидно, что необходимость в применении компенсаторов (т. е. в введении  $\Delta y_{кз}$ ) возникает в том случае, когда суммарное влияние погрешностей больше допустимого значения. Для выяснения этого суммируют левую часть выражения (2.8) при  $\Delta y_{кз} = 0$ . Однако полученный результат не позволяет определить степень влияния каждой первичной погрешности и фактора, поэтому компенсаторы и допуски на первичные погрешности назначаются здесь весьма произвольно, на основании аналогий и опыта разработчика.

Методику расчета компенсаторов более целесообразно основывать на проектных расчетах; когда по заданному показателю качества прибора (функционального устройства), его схеме, конструкции и условиям эксплуатации определяют допустимые значения первичных погрешностей. При таком подходе определяется степень влияния каждой первичной погрешности и фактора и, следовательно, могут быть найдены погрешности, требующие компенсации.

Определение того, что  $\Delta y_{\Sigma} > \Delta y_{vd}$ , а также степени влияния каждой первичной погрешности и фактора на показатель качества

производится с помощью коэффициентов влияния  $\lambda_i = |\Delta y_{vd}/\Delta y_{\Delta q_i}|$ , где  $\Delta y_{\Delta q_i}$  — частичное влияние [18]. Если окажется, что имеются погрешности и факторы с значением  $\lambda_i$ , меньшим, чем наименьшее допустимое значение ( $\lambda_0$ ) этого коэффициента, то условие (2.8) может быть выполнено только с помощью компенсаторов (т. е.  $\Delta y_{K\Sigma} \neq 0$ ), устраняющих или ослабляющих действие этих погрешностей и факторов.

Наименьшее допустимое значение коэффициента влияния определяют, исходя из выражения (2.8) (если приравнять  $\Delta y_{K\Sigma} = 0$ ) при условии равенства частных влияний групп  $n_c$ ,  $n_1$  и  $n_2$ . Для этого вначале находят выражения для коэффициентов влияния частных погрешностей различных групп (приравнивая число частных влияний других групп в формуле (2.8) нулю):

$$\lambda_c = \Delta y_{vd}/(A_q \Delta q); \quad (2.9)$$

$$\lambda_1 = \Delta y_{vd}/[A_c(C_p + k_p) \delta q]; \quad (2.10)$$

$$\lambda_2 = \Delta y_{vd}/(A_c k_p \delta q). \quad (2.11)$$

Преобразовав выражения (2.9)–(2.11) и подставив их в (2.8), получим

$$\begin{aligned} \Delta y_{vd} = & \sum_i^{n_c} \Delta y_{vd}/\lambda_{ci} + \sum_i^{n_1} \Delta y_{vd} C_{pi}/[(C_{pi} + k_{pi}) \lambda_{1i}] + \\ & + \sqrt{\sum_i^{n_1} \Delta y_{vd}^2 k_{pi}^2 / [(C_{pi} + k_{pi})^2 \lambda_{1i}^2] + \sum_i^{n_2} \Delta y_{vd}^2 / \lambda_{2i}^2}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Далее сократим выражение (2.12) на  $\Delta y_{vd}$

$$\begin{aligned} 1 = & \sum_i^{n_c} 1/\lambda_{ci} + \sum_i^{n_1} C_{pi}/[(C_{pi} + k_{pi}) \lambda_{1i}] + \\ & + \sqrt{\sum_i^{n_1} k_{pi}^2 / [(C_{pi} + k_{pi})^2 \lambda_{1i}^2] + \sum_i^{n_2} 1/\lambda_{2i}^2}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

При условии равного влияния частных погрешностей (т. е. при  $\lambda_{ci} = \lambda_{1i} = \lambda_{2i} = \lambda_0$ ) получим

$$\lambda_0 = n_c + \sum_i^{n_1} C_{pi}/(C_{pi} + k_{pi}) + \sqrt{\sum_i^{n_1} k_{pi}^2 / (C_{pi} + k_{pi})^2 + n_2}. \quad (2.14)$$

Учитывая, что для большого числа технологических погрешностей группы  $n_1$  обычно выполняется следующее соотношение [18]

$$C_{pi}/(C_{pi} + k_{pi}) \approx k_{pi}/(C_{pi} + k_{pi}) \approx 0,5, \quad (2.15)$$

а также, что число погрешностей группы  $n_1$  в приборе, как правило, невелико, наименьшее допустимое значение коэффициента влияния можно найти по упрощенной приближенной зависимости

$$\lambda_0 \approx n_c + 0,5n_1 + \sqrt{0,25n_1 + n_2}. \quad (2.16)$$

Прежде чем принять окончательное решение о компенсации той или иной погрешности или фактора, имеющих  $\lambda_i < \lambda_0$ , следует уточнить значение  $\lambda_0$ , отбросив ничтожно влияющие на качество прибора погрешности и факторы. Критерием ничтожности влияния погрешности является условие  $\lambda_i \geq \lambda_n$ , где  $\lambda_n$  — коэффициент влияния ничтожно малых погрешностей и факторов, определяемый из условия, что отбрасываемые частичные влияния не изменяют значения  $\Delta y_{\Sigma}$  более чем на 5—10 %:

$$\begin{aligned}
 a \Delta y_{vd} = & \sum_i^{n_c} A_{qi} \Delta q_i - \sum_i^{n_{ch}} A_{qi} \dot{\Delta} q_i + \sum_i^{n_1} A_{ci} C_{pi} \delta q_i - \sum_i^{n_{1H}} A_{ci} C_{pi} \delta q_i + \\
 & + \sqrt{\sum_i^{n_1} A_{ci}^2 k_{pi}^2 \delta q_i^2 - \sum_i^{n_{1H}} A_{ci}^2 k_{pi}^2 \delta q_i^2 + \sum_i^{n_2} A_{ci}^2 k_{pi}^2 \delta q_i^2 - \sum_i^{n_{2H}} A_{ci}^2 k_{pi}^2 \delta q_i^2} = \\
 & = \sum_i^{n_c} \Delta y_{vd} / \lambda_{ci} - \sum_i^{n_{ch}} \Delta y_{vd} / \lambda_{chi} + \\
 & + \sum_i^{n_1} \Delta y_{vd} C_{pi} / [(C_{pi} + k_{pi}) \lambda_{1i}] - \sum_i^{n_{1H}} \Delta y_{vd} C_{pi} / [(C_{pi} + k_{pi}) \lambda_{1Hi}] + \\
 & + \sqrt{\sum_i^{n_1} \Delta y_{vd}^2 k_{pi}^2 / [(C_{pi} + k_{pi})^2 \lambda_{1i}^2] - \sum_i^{n_{1H}} \Delta y_{vd}^2 k_{pi}^2 / [(C_{pi} + k_{pi})^2 \lambda_{1Hi}^2] + \\
 & + \sum_i^{n_2} \Delta y_{vd}^2 / \lambda_{2i}^2 - \sum_i^{n_{2H}} \Delta y_{vd}^2 / \lambda_{2Hi}^2}, \quad (2.17)
 \end{aligned}$$

где  $a = (0,95 \div 0,9)$  — коэффициент, учитывающий уменьшение суммарной погрешности на 5—10 %;  $n_{ch}$ ,  $n_{1H}$ ,  $n_{2H}$  — число ничтожно малых частичных погрешностей групп  $n_c$ ;  $n_1$ ,  $n_2$  соответственно;  $\lambda_{ch}$ ,  $\lambda_{1H}$ ,  $\lambda_{2H}$  — коэффициенты их влияния соответственно.

Сократив выражение (2.17) на  $\Delta y_{vd}$ , получим

$$\begin{aligned}
 a = & \sum_i^{n_c} 1 / \lambda_{ci} + \sum_i^{n_1} C_{pi} / [(C_{pi} + k_{pi}) \lambda_{1i}] - \sum_i^{n_{ch}} 1 / \lambda_{chi} - \\
 & - \sum_i^{n_{1H}} C_{pi} / [(C_{pi} + k_{pi}) \lambda_{1Hi}] + \sqrt{\sum_i^{n_1} k_{pi}^2 / [(C_{pi} + k_{pi})^2 \lambda_{1i}^2] + \\
 & + \sum_i^{n_2} 1 / \lambda_{2i}^2 - \sum_i^{n_{1H}} k_{pi}^2 / [(C_{pi} + k_{pi})^2 \lambda_{1Hi}^2] - \sum_i^{n_{2H}} 1 / \lambda_{2Hi}^2}.
 \end{aligned}$$

Примем, что  $\lambda_{ci} = \lambda_{1i} = \lambda_{2i} = \lambda_0$ ;  $\lambda_{chi} = \lambda_{1Hi} = \lambda_{2Hi} = \lambda_n$ ;  $C_{pi} / (C_{pi} + k_{pi}) \approx k_{pi} / (C_{pi} + k_{pi}) \approx 0,5$ , и после некоторых преобразований найдем

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0 [A (n_{ch} + 0,5n_{1H}) \pm \sqrt{B (n_{ch} + 0,5n_{1H})^2 + (B - A^2) (0,25n_{1H} + n_{2H})}]}{A^2 - B}, \quad (2.18)$$

где  $A = n_c + 0,5n_1 - \lambda_0 a$ ;  $B = 0,25n_1 + n_2$ .

При выполнении расчетов к ничтожно малым погрешностям предварительно относят: погрешности второго порядка малости, а также те, которые меньше других в три раза и более (т. е. у которых  $\lambda_i \geq 3\lambda_0$ ). В том случае, когда отсутствуют систематические погрешности ( $n_c = 0$ ) и ничтожно малые погрешности группы  $n_1$  ( $n_{1н} = 0$ ), коэффициент ничтожного влияния погрешностей группы  $n_2$  определяют либо по зависимости, полученной из формулы (2.18)

$$\lambda_n = \lambda_0 \sqrt{n_{2н} / [0,25n_1(1 - n_1) + a\lambda_0(n_1 - a\lambda_0) + n_2]}, \quad (2.19)$$

либо из выражения [18, 37]

$$\lambda_n = \sqrt{k\lambda_0 n_{2н} / (2\lambda_0 - n_1)},$$

где  $k = 10$  (при 10 %-ном риске) и  $k = 20$  (при 5 %-ном риске).

В том случае, когда отсутствуют и погрешности группы  $n_1$  ( $n_1 = 0$ ), из формулы (2.19) получим

$$\lambda_n = \sqrt{\lambda_0^2 n_{2н} / (n_2 - \lambda_0^2 a^2)}.$$

Так как при  $n_c = n_1 = 0$  наименьшее допустимое значение коэффициента влияния  $\lambda_0 = \sqrt{n_2}$ , то  $\lambda_n = \sqrt{n_{2н} / (1 - a^2)}$ , что согласуется с данными работы [18] и с известным критерием ничтожно малых погрешностей по М. Ф. Маликову (см. Маликов М. Ф. Основы метрологии, М., 1949).

Уточненное значение  $\lambda_0$  находят по формуле

$$\lambda'_0 = n_c - n_{сн} + 0,5(n_1 - n_{1н}) + \sqrt{0,25(n_1 - n_{1н}) + n_2 - n_{2н}}. \quad (2.20)$$

Выявив все погрешности, требующие компенсации (т. е. погрешности с  $\lambda_i < \lambda'_0$ ), выбирают тот или иной компенсатор для устранения влияния одной или нескольких погрешностей.

При этом учитывают величину и характер влияния (случайное, неслучайное, аддитивное, мультипликативное, периодическое и т. п.), условия производства (серийность, наличие необходимого оборудования, квалификацию рабочих) и эксплуатации прибора. Эти факторы позволяют выбрать метод компенсации и определить требования к компенсатору с точки зрения возможности применения того или иного метода, точности компенсатора, его надежности, экономичности и диапазон работы. Вначале выбирают компенсатор для компенсации наиболее сильно влияющей погрешности, а также такой, который позволяет компенсировать не одну, а несколько погрешностей сразу.

Точность компенсатора определяют исходя из требуемой точности компенсации, характеризующей остаточной величиной компенсируемого влияния либо компенсируемой погрешности или фактора:

$$\Delta y_{нк} = \Delta y_{\Delta q} - \Delta y_{к}; \quad \Delta q_{нк} = \Delta q - \Delta q_{к}.$$

Величина недокомпенсации также имеет коэффициент влияния на показатель качества

$$\lambda_{нк} = |\Delta y_{\Delta q} / \Delta y_{нк}| = |\Delta y_{\Delta q} / (A_q \Delta q_{нк})|. \quad (2.21)$$

Максимальное допустимое значение недокомпенсации определяют с учетом условия  $\lambda_{\text{нк}} \geq \lambda_0$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{\text{нк max}} &= \Delta y_{\text{vd}} / \lambda_0; \\ \Delta q_{\text{нк max}} &= \Delta y_{\text{vd}} / (A_q \lambda_0). \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

При этом влияние компенсируемой погрешности или фактора уменьшено до значения, не нарушающего требуемого качества.

Значение недокомпенсации, удовлетворяющее условию:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{\text{нк min}} &\leq \Delta y_{\text{vd}} / \lambda_{\text{н}}; \\ \Delta q_{\text{нк min}} &\leq \Delta y_{\text{vd}} / (A_q \lambda_{\text{н}}). \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

означает, что влияние данной погрешности или фактора можно считать полностью компенсированным (так как  $\lambda_{\text{нк}} \geq \lambda_{\text{н}}$ ). В том случае, когда компенсатор воздействует на какой-то параметр прибора, его коррекцию определяют по формуле

$$\Delta y_{kj} = (\partial y / \partial q_i) (\partial q_i / \partial z_{kj}) \Delta z_{kj} = A_{qi} A_{zj} \Delta z_{kj} = A_{kj} \Delta z_{kj}.$$

Изменение коррекции должно быть таким, чтобы выполнялись условия (2.22) или (2.23). Отсюда можно определить требования к величине  $A_{kj}$  при известном минимальном значении коррекционного сигнала  $\Delta z_{kj \text{ min}}$ , которое может быть создано выбираемым методом компенсации, либо требования к  $\Delta z_{kj \text{ min}}$ , при известном значении  $A_{kj}$ :

$$A_{kj \text{ max}} = \Delta y_{\text{vd}} / (\lambda_0 \Delta z_{kj \text{ min}}); \quad (2.24)$$

$$A_{kj \text{ min}} = \Delta y_{\text{vd}} / (\lambda_{\text{н}} \Delta z_{kj \text{ min}}); \quad (2.25)$$

$$\Delta z_{kj \text{ min}} = \Delta y_{\text{vd}} / (\lambda_0 A_{kj}); \quad (2.26)$$

$$\Delta z_{kj \text{ min}} = \Delta y_{\text{vd}} / (\lambda_{\text{н}} A_{kj}). \quad (2.27)$$

Здесь  $\Delta z_{kj \text{ min}}$  — минимальное значение коррекционного сигнала, обеспечивающее уменьшение компенсируемой погрешности до значения, не нарушающего требуемого качества;  $\Delta z_{kj \text{ min}}$  — значение коррекционного сигнала, обеспечивающего полную компенсацию погрешности.

Диапазон работы компенсатора при компенсации одной погрешности (фактора) определяется ее максимальным значением

$$\Delta z_{kj \text{ max}} = \Delta y_{\text{vd}} / (\lambda_i A_{kj}), \quad (2.28)$$

а при компенсации нескольких погрешностей (или факторов) — их максимальным суммарным значением. Например, при компенсации  $n$  технологических погрешностей (случайных по природе)

$$\Delta z_{kj \text{ max}} \approx \Delta y_{\text{vd}} \sqrt{\sum_i^n 1/\lambda_i^2} / A_{kj}. \quad (2.29)$$

Действие компенсатора приводит к тому, что компенсируемое влияние одной погрешности или фактора (либо сама погрешность): 1) уменьшено до значения, не нарушающего требуемого качества



(коэффициент влияния недокомпенсации  $\lambda_{нк}$  при этом  $\lambda_n > \lambda_{нк} \geq \lambda_0$ ); 2) полностью устранено ( $\lambda_{нк} \geq \lambda_n$ ).

В первом случае наименьшее допустимое значение коэффициента влияния, которое обозначим теперь  $\lambda_0^{1к}$  [вычисленное по формуле (2.20), но с учетом того, что компенсатор увеличивает или оставляет неизменным число ничтожно малых погрешностей], остается неизменным, а во втором случае — уменьшается. Условие  $\lambda_{нк} < \lambda_0$  обычно указывает на неправильность выбора компенсатора:

Если одним компенсатором устраняется действие  $n$  погрешностей, то возможны следующие случаи: 1) при условии, что суммарная недокомпенсация имеет коэффициент влияния  $\lambda_{нк \Sigma} \geq \lambda_n$ , эти погрешности исключаются из расчета  $\lambda_0^{1к}$ ; 2) при  $\lambda_n > \lambda_{нк \Sigma} \geq \lambda_0$  эти погрешности заменяются одной, не нарушающей требуемого качества; 3) при  $\lambda_{нк \Sigma} < \lambda_0$  из формулы для расчета  $\lambda_0^{1к}$  мы также исключаем  $n - 1$  погрешностей, но остаточная недокомпенсация продолжает влиять так сильно, что требуемого показателя качества не получить (т. е. возможно, что потребуются компенсировать недокомпенсацию).

После того как ввели первый компенсатор, выявляют наличие погрешностей и факторов, у которых  $\lambda_i < \lambda_0^{1к}$ , и тогда вводят второй компенсатор.

Окончательно число компенсаторов  $k$  определяют при отсутствии погрешностей и факторов, у которых  $\lambda_i < \lambda_0^{кк}$ . При этом будут выполнены условия (2.5) и (2.8).

Так как в выражении (2.5) учитывается число компенсаторов, обеспечивающих только какой-то один показатель качества ОП, то общее число компенсаторов находят суммированием числа компенсаторов по всем показателям качества, которые могут быть определены также с помощью изложенной методики.

При выполнении расчетов компенсаторов по данной методике для определения коэффициентов влияния каждой первичной погрешности и фактора необходимо задать их значение. Значения систематических погрешностей (теоретических ошибок, деформаций от известных сил и т. д.) вычисляют по известным конструктивным параметрам прибора и условиям его эксплуатации. Значения влияющих факторов определяют исходя из условий эксплуатации прибора и его параметров, а также на основании известных экспериментальных данных о значении того или иного фактора. Например, известно, что погрешность совмещения марок из-за ограниченной остроты зрения оператора ( $\Delta\alpha$ ) в случае нониальных наводок характеризуется средним значением стандартного отклонения, равного 10—15". Следовательно, при определении коэффициента влияния этого фактора ( $\lambda$ ) будем задавать его значение половиной практически вероятного поля рассеяния, равного 30—45". На основании известных данных задают также пределы колебаний сил трения в кинематических парах (с учетом материалов пар, их конструкции, нагрузок, шероховатости поверхностей, смазки), рефракцию воздушных слоев

(учитывая возможное состояние атмосферы, толщину воздушного слоя) и т. д.

Значения технологических погрешностей задают допусками на изготовление и сборку деталей прибора. Так как стоимость прибора в существенной мере определяется трудоемкостью изготовления и сборки его деталей, то заданные допуски будут определять также технологичность прибора. Это обстоятельство, а также экономическая целесообразность применения компенсаторов технологических погрешностей (см. концептуальную модель) учитывается в рассмотренной методике экономическими уровнями точности технологических процессов изготовления и сборки деталей.

Сначала допуски на все технологические погрешности задают по экономическому уровню точности технологических процессов ( $\delta q_0$ ). Этому уровню соответствует точность, получаемая в серийном производстве при изготовлении деталей на автоматическом и универсальном оборудовании с помощью типового инструмента, оснастки и приспособлений. Сборка осуществляется без пригонки и регулировок. Контроль производят с помощью цехового инструмента (микрометров, индикаторов, калибров, эталонных стекол). Для заводов оптической промышленности экономическому уровню в среднем соответствуют допуски по 9—11-му квалитетам точности.

Вычислив значения частных влияний первичных погрешностей, которые заданы допусками на экономическом уровне точности, можно найти соответствующие коэффициенты их влияния ( $\lambda_{ai} = |\Delta y_{vd}/(Aq_i \delta q_{ai})|$ ) на качество ОП. При  $\lambda_{ai} \geq \lambda_0$  допуск на данную погрешность может быть задан на экономическом уровне точности. Если  $\lambda_{ai} < \lambda_0$ , то допуск на такую погрешность должен быть ужесточен до значения, соответствующего производственному уровню точности технологических процессов.

Производственному уровню соответствует точность, получаемая в серийном производстве при изготовлении деталей на универсальном оборудовании, но с применением специального инструмента, оснастки и технологических процессов (например, при изготовлении деталей на шлифовальных станках с использованием разверток, кондукторов, приспособлений для центрировки заготовки и с увеличением числа повторных циклов обработки поверхностей деталей). Этому уровню точности соответствует сборка с элементами компенсации погрешностей подвижками деталей, сопровождающимися контролем на качественном уровне и с использованием производственных средств контроля. Производственному уровню соответствуют в среднем допуски по 6—8-му квалитетам точности.

После вычисления коэффициентов влияния погрешностей, допуск на которые задают по производственному ( $\delta q_{pi}$ ) уровню точности ( $\lambda_{pi} = |\Delta y_{vd}/(Aq_i \delta q_{pi})|$ ) путем их сравнения с  $\lambda_0$  выясняют возможность назначения допуска на этом уровне (при  $\lambda_{pi} \geq \lambda_0$ ). Для погрешностей с  $\lambda_{pi} < \lambda_0$  назначают еще более высокий допуск (соответствующий техническому уровню точности технологических процессов).

Техническому уровню соответствует предельная точность, которая может быть достигнута с помощью специального оборудования, инструмента и технологических процессов. Например, для достижения точности нанесения делений на штриховых лимбах (диаметром около 100 мм) с погрешностью не более  $1''$  используют прецизионные делительные машины, осуществляют стабилизацию температуры (до сотых долей градуса), давления и влажности в рабочем помещении, защиту от вибраций и т. п. Этому уровню точности соответствует сборка с пригонками и регулировками, сопровождающаяся контролем лабораторными средствами (автоколлиматорами, интерферометрами, микроскопами). Техническому уровню соответствует в среднем допуск по 4—5-му квалитетам.

После вычисления коэффициентов влияния погрешностей, допуски на которые были заданы по техническому ( $\delta q_{ti}$ ) уровню точности ( $\lambda_{ti} = |\Delta y_{ed}/(A_{qi}\delta q_{ti})|$ ), определяют возможность назначения допусков на этом уровне (при  $\lambda_{ti} \geq \lambda'_0$ ) либо необходимость их компенсации (при  $\lambda_{ti} < \lambda'_0$ ). Исходя из затрат на выполнение того или иного допуска  $\delta q_{ti}$ , можно определить также целесообразность компенсации этой погрешности в случае, если затраты на компенсатор будут меньше (обычно применение компенсатора целесообразно в случае единичного и мелкосерийного производства).

Основными факторами, позволяющими определить экономический эффект принимаемого решения, являются условия производства: серийность прибора, наличие необходимого оборудования, оснастки, контрольно-юстировочных приспособлений и т. п. После проведения расчетов компенсаторов, необходимых для обеспечения требуемых показателей качества ОП, производят уточнение допусков на первичные погрешности (см. п. 2.4).

Для машинной реализации методики расчета компенсаторов целесообразно использовать два алгоритма. С помощью первого алгоритма можно выявить степень влияния каждой первичной погрешности, уточнить допустимые значения первичных погрешностей и определить число погрешностей, требующих компенсации. По второму алгоритму на основании данных, полученных при расчетах по первому алгоритму, определяют число компенсаторов и требования к их параметрам. Работа этого алгоритма организована в режиме прямого диалога оператора с ЭВМ. Процесс расчетов является итерационным и основан на использовании результатов, получаемых при реализации последовательных шагов.

Первый алгоритм можно представить в следующем виде:

1. Задать следующие данные:

число погрешностей  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

значения первичных погрешностей  $\Delta q_i$  (технологические погрешности задать допусками, соответствующими экономическому  $\delta q_{ei}$ , производственному  $\delta q_{pi}$  и техническому  $\delta q_{ti}$  уровням точности технологических процессов);

значения передаточных коэффициентов первичных погрешностей  $A_{qi}$ ,  $A_{ci}$ ;

число частичных влияний групп  $n_c$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ ;

значения коэффициентов  $C_{pi}$  и  $k_{pi}$  для случайных первичных погрешностей;

коэффициент риска при отбрасывании ничтожно малых ошибок  $\alpha$ ; значение допуска на показатель качества  $\Delta y_{vd}$ .

2. Вычислить по формуле (2.14) значение наименьшего допустимого коэффициента влияния  $\lambda_0$ .

3. Вычислить значения частичных влияний погрешностей групп  $n_c$ ,  $n_1$  и  $n_2$  по следующим формулам:

$$\Delta y_{\delta q_i} = A_{qi} \Delta q_i; \quad \Delta y_{\delta q_{1i}} = A_{ci} (C_{pi} + k_{pi}) \delta q_{1i}; \quad \Delta y_{\delta q_{2i}} = A_{ci} k_{pi} \delta q_{2i}.$$

Для технологических погрешностей расчет произвести по допускам  $\delta q_a$ , соответствующим экономическому уровню точности.

4. Вычислить коэффициенты влияния  $\lambda_i$  погрешностей по формулам (2.9)—(2.11).

5. Сравнить полученные значения  $\lambda_i$  с  $\lambda_0$ : если  $\lambda_i \geq 3\lambda_0$ , занести их в группу для проверки на ничтожное влияние ( $n_{ni}$ ); если  $\lambda_i < 3\lambda_0$ , — в группу  $n_j$ .

6. Вычислить по формуле (2.18) коэффициент ничтожного влияния  $\lambda_n$  и вывести на регистратор (дисплей, печать). При выполнении машинного расчета значение  $\lambda_n$  может быть вычислено не по приближенной формуле (2.18), а по формуле, учитывающей коэффициенты  $C_{pi}$  и  $k_{pi}$  [см. формулу (2.17)].

7. Сравнить значение  $\lambda_i$  из группы  $n_{ni}$  с  $\lambda_n$ : если  $\lambda_i \geq \lambda_n$ , занести их в группу ничтожно влияющих ( $n_n$ ) и вывести на регистратор; если  $\lambda_i < \lambda_n$ , вывести значение первичной погрешности и коэффициент влияния на регистратор.

8. Рассчитать по формуле (2.20) уточненное значение наименьшего допустимого коэффициента влияния  $\lambda'_0$  и вывести его на регистратор.

9. Сравнить значение  $\lambda_i$  из группы  $n_j$  с  $\lambda'_0$ : если  $\lambda_i \geq \lambda'_0$ , вывести значение первичной погрешности и коэффициент влияния на регистратор; если коэффициент влияния систематических погрешностей и влияющих факторов  $\lambda_i < \lambda'_0$ , занести их в число погрешностей, требующих компенсации  $N_{ki}$ ; если коэффициент влияния технологических погрешностей  $\lambda_i < \lambda'_0$ , выполнить пп. 3 и 4 (расчет производить по допускам  $\delta q_{pi}$ , соответствующим производственному уровню точности).

10. Сравнить рассчитанные в пп. 3 и 4 значения коэффициентов влияния  $\lambda_{pi}$  с  $\lambda'_0$ : если  $\lambda_{pi} \geq \lambda'_0$ , вывести допуск и коэффициент влияния на регистратор; если  $\lambda_{pi} < \lambda'_0$ , выполнить пп. 3 и 4 (расчеты производить по допускам  $\delta q_{ti}$ , соответствующим техническому уровню точности).

11. Сравнить рассчитанные в пп. 3 и 4 значения коэффициентов влияния  $\lambda_{ti}$  с  $\lambda'_0$ : если  $\lambda_{ti} \geq \lambda'_0$ , вывести допуски и коэффициенты влияния на регистратор; если  $\lambda_{ti} < \lambda'_0$ , занести их в число погрешностей, требующих компенсации  $N_{ki}$  и вывести допуски и коэффициенты влияния на регистратор.

12. Конец.

Исходя из вида погрешностей, требующих компенсации  $N_{ki}$ , их коэффициентов влияния  $\lambda_i$ , условий производства оператор выбирает тот или иной компенсатор для компенсации одной или нескольких погрешностей. При этом он вводит значение наименьшего сигнала на компенсатор, которое может быть создано выбранным методом компенсации  $\Delta z_{kj \min}$ , либо значение передаточного коэффициента компенсатора  $A_{kj}$ .

Дальнейший расчет производится по второму алгоритму, который можно представить в следующем виде:

1. Задать значение  $\Delta z_{kj \min}$  (либо  $A_{kj}$ ).
2. Рассчитать по формулам (2.22), (2.23) максимальное и минимальное значения недокомпенсации ( $\Delta y_{нк \max i}$ ,  $\Delta y_{нк \min i}$ ,  $\Delta q_{нк \max i}$ ,  $\Delta q_{нк \min i}$ ) и вывести их на регистратор.
3. По формулам (2.24)—(2.27) произвести расчет  $A_{kj}$  (если было задано  $\Delta z_{kj \min}$ ) либо расчет  $\Delta z_{kj \min}$  (если было задано  $A_{kj}$ ), рассчитанные значения вывести на регистратор.
4. Вычислить по формулам (2.28), (2.29) диапазон работы компенсатора  $\Delta z_{kj \max}$ , результат вывести на регистратор.
5. Вычислить значение коэффициента недокомпенсации  $\lambda_{нк i}$  по формуле (2.21), вывести на регистратор.
6. Сравнить значение  $\lambda_{нк i}$  с  $\lambda'_0$  и  $\lambda_n$ : если  $\lambda_{нк i} \geq \lambda_n$ , то погрешность (или погрешности) полностью компенсирована, ее (или их) занести в группу ничтожно малых  $n_k$  и по формуле (2.20) рассчитать значение  $\lambda_0^{1k}$ , которое вывести на регистратор; если  $\lambda_n > \lambda_{нк i} \geq \lambda'_0$ , то в случае компенсации одной погрешности значению  $\lambda_0^{1k}$  присвоить значение  $\lambda'_0$ ; если  $\lambda_n > \lambda_{нк i} < \lambda'_0$ , то в случае компенсации одним компенсатором  $n_k$  погрешностей значение  $\lambda_0^{1k}$  рассчитать по формуле (2.20), при отнесении к ничтожно малым  $n_k - 1$  погрешностей, и результат вывести на регистратор; если  $\lambda_{нк i} < \lambda'_0$ , то в случае компенсации одной погрешности на регистратор подать метку «Ошибка в выборе метода компенсации»; если  $\lambda_{нк i} < \lambda'_0$ , то в случае компенсации  $n_k$  погрешностей значение  $\lambda_0^{1k}$  рассчитать по формуле (2.20) при отнесении к ничтожно малым  $n_k - 1$  погрешностей, затем вывести на регистратор,  $n_k$  погрешностей в числе  $N_{ki}$  заменить одной погрешностью, значение которой ( $\Delta y_{нк}$  или  $\Delta q_{нк}$ ) и коэффициент влияния  $\lambda_{нк}$  также вывести на регистратор.
7. Сравнить значения  $\lambda_i$  из группы  $N_{ki}$  с  $\lambda_0^{1k}$ : если  $\lambda_i \geq \lambda_0^{1k}$ , вывести погрешность из группы  $N_{ki}$ ; если  $\lambda_i < \lambda_0^{1k}$ , ввести второй компенсатор и перейти к п. 1.

Весь цикл повторить до условия, что коэффициенты влияния погрешностей из группы  $N_k$  примут значения  $\lambda_i \geq \lambda_0^{kk}$ .

8. Конец.

Рассчитав компенсаторы, необходимые для обеспечения одного из показателей качества ОП, переходят к расчету по данным алгоритмам компенсаторов, обеспечивающих соответствие прибора другим показателям. Применение ЭВМ позволяет ускорить процесс расчетов и использовать более точные формулы для их выполнения.

Особенно удобно производить с помощью ЭВМ уточнение допусков на первичные погрешности и факторы по алгоритму, основы которого изложены в п. 2.4.

### 2.3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ КОМПЕНСАТОРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

Используем изложенную выше методику для расчета компенсаторов, обеспечивающих некоторые показатели качества простых ОП и функциональных узлов. Примеры подобраны так, чтобы охватить различные типы функциональных преобразователей с различными

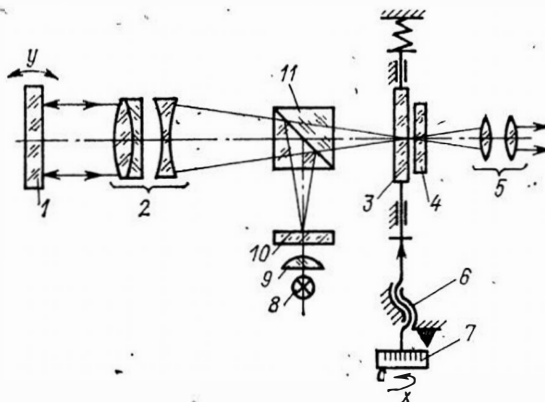


Рис. 2.1. Схема автоколлиматора:

- 1 — зеркало; 2 — объектив; 3 — подвижная сетка окулярного винтового микрометра; 4 — неподвижная сетка с грубой шкалой; 5 — окуляр; 6 — винтовой механизм; 7 — точная шкала; 8 — источник света; 9 — конденсор; 10 — сетка; 11 — светоделительная призма-куб

показателями качества, разнородными погрешностями и компенсаторами.

**Расчет компенсаторов автоколлиматора.** Предположим, что требуется создать автоколлиматор на базе автоколлимационной торцевой трубки [33] со следующими техническими данными: пределы измерения угла наклона зеркала ( $y$ ) —  $\pm 20'$ , цена деления точной шкалы ( $A_T$ ) —  $5''$ , допустимое предельное вероятное значение погрешности автоколлиматора ( $\Delta y_{vd}$ ) —  $5''$ .

Разработанный автоколлиматор (рис. 2.1) основан на измерении перемещения автоколлимационного изображения сетки 10 при наклоне зеркала 1 с помощью окулярного винтового микрометра 3—7, точная шкала 7 которого имеет 60 делений (цена деления —  $5''$ ), а грубая шкала —  $\pm 4$  деления (цена деления —  $5'$ ). Искомый угол поворота ( $y$ ) зеркала связан следующей зависимостью с конструктивными параметрами автоколлиматора:

$$y = \frac{1}{2} \arctg \frac{kp}{f'2\pi} x,$$

Таблица 2.1

| №№<br>пп | Первичная погрешность ПП<br>( $\Delta q$ )                                               | Частичные погрешности<br>( $\Delta y_{\Delta q}$ ) |                            |                            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|
|          |                                                                                          | $n_c$                                              | $n_1$                      | $n_2$                      |
| 1        | Теоретическая $\Delta y_T$                                                               | $\Delta y_T$                                       | —                          | —                          |
| 2        | Погрешность фокусного расстояния объектива $\Delta f$                                    | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta f}$      |
| 3        | Погрешность деления точной шкалы $\Delta \phi$                                           | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta \phi}$   |
| 4        | Эксцентриситет точной шкалы $\Delta e$                                                   | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta e}$      |
| 5        | Погрешность снятия отсчетов $\Delta n$                                                   | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta n}$      |
| 6        | Погрешность совмещения марки подвижной сетки с автоколлимационной маркой $\Delta \alpha$ | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta \alpha}$ |
| 7        | Погрешность совмещения марки подвижной сетки из-за параллакса $\Delta p$                 | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta p}$      |
| 8        | Погрешность шага винта $\Delta t$                                                        | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta t}$      |
| 9        | Зазор в паре винт—гайка $\Delta c_0$                                                     | —                                                  | $\Delta y_{\Delta c_0}$    | —                          |
| 10       | Непараллельность перемещений винта и сетки $\Delta \gamma$                               | —                                                  | $\Delta y_{\Delta \gamma}$ | —                          |
| 11       | Погрешность формы опорной площадки винта $\Delta h$                                      | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta h}$      |
| 12       | Изменение контактной деформации пары винт-площадка $\Delta d$                            | $\Delta y_{\Delta d}$                              | —                          | —                          |
| 13       | Зазор в направляющих сетки $\Delta c_H$                                                  | —                                                  | $\Delta y_{\Delta c_H}$    | —                          |
| 14       | Погрешность формы направляющих сетки $\Delta h_H$                                        | —                                                  | —                          | $\Delta y_{\Delta h_H}$    |

где  $k$  — число заходов;  $p$  — шаг винта винтового механизма;  $f'$  — фокусное расстояние объектива;  $x$  — угол поворота точной шкалы.

Так как измеряются небольшие углы поворота зеркала, то в основу работы автоколлиматора положена приближенная зависимость

$$y_n = kpx/(4f'\pi) = kpn/(2f'n_T).$$

Здесь  $k = 1$ ;  $p = 1$  мм;  $f' = 343,64$ ;  $n$  — угол поворота точной шкалы в делениях,  $n_{\max} = n_T n_T = \pm 240$ , где  $n_T$  — число делений грубой шкалы;  $n_T$  — число делений точной шкалы.

Определим число компенсаторов, позволяющих обеспечить заданную точность работы автоколлиматора, созданного по этой схеме, а также требования к компенсаторам. При этом одновременно определяют допуски (или уточняют их, если они были получены при проверочном точностном расчете, проводившемся при конструировании) на технологические первичные погрешности.

В табл. 2.1 приведены первичные погрешности, влияющие на точность автоколлиматора, и осуществлено распределение вызванных ими частичных погрешностей по группам  $n_c$ ,  $n_1$ ,  $n_2$ . Значение

наименьшего допустимого коэффициента влияния согласно формуле (2.16) составляет  $\lambda_0 = 6,6$ . Результаты расчетов для определения степени влияния частичных погрешностей приведены в табл. 2.2.

Как видно из таблицы, ничтожно малое влияние на точность автоколлиматора оказывают погрешности 1, 3, 10, 12, 13, 14. Проверку правильности отнесения данных погрешностей к ничтожно малым производим с помощью  $\lambda_n = 31$ , вычисленного по формуле (2.18) при  $a = 0,9$ . По формуле (2.20) находим  $\lambda_0 = 3,2$ . Требуют компенсации погрешность фокусного расстояния объектива ( $\Delta f'$ ) и зазор в винтовом зацеплении ( $\Delta c_0$ ).

Компенсировать обе погрешности одним компенсатором не представляется возможным, так как зазор в винтовом зацеплении является переменной нерегулярной величиной. Компенсацию погрешности фокусного расстояния можно осуществить, например, изменением воздушного промежутка между линзами объектива. Недокомпенсация определяется главным образом погрешностью измерения фокусного расстояния объектива и чувствительностью регулировки.

Таблица 2.2

| № №<br>пп | Частичная погрешность $\Delta y \Delta q$ | Общее выражение частичной погрешности $A q \Delta q$ | Численное значение первичной погрешности для технологических ПП | Численное значение частичной погрешности, ..." | Коэффициент влияния $\lambda$ |
|-----------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|
| 1         | $\Delta y_T$                              | $-4y^3/3$                                            | 0,05"                                                           | 0,05                                           | 100                           |
| 2         | $\Delta y_{\Delta f'}$                    | $(y/f') \Delta f'$                                   | 3,4 мм                                                          | 12                                             | 0,4                           |
| 3         | $\Delta y_{\Delta \varphi}$               | $(y/x) \Delta \varphi$                               | 10'                                                             | 0,06                                           | 83,3                          |
| 4         | $\Delta y_{\Delta e}$                     | $(y/xR) \sin(x + \theta_0) \Delta e$                 | 125 мкм                                                         | 0,4                                            | 12,5                          |
| 5         | $\Delta y_{\Delta n}$                     | $0,5 A \Delta n$                                     | 1/5 деления                                                     | 0,5                                            | 10                            |
| 6         | $\Delta y_{\Delta \alpha}$                | $[250/(2f' \Gamma)] \Delta \alpha$                   | 30"                                                             | 0,7                                            | 7,1                           |
| 7         | $\Delta y_{\Delta p}$                     | $[\Gamma t/(2f' 250)] \Delta p$                      | 55 мкм                                                          | 0,46                                           | 10,86                         |
| 8         | $\Delta y_{\Delta t}$                     | $[1/(2f')] \Delta t$                                 | 3,0 мкм                                                         | 0,87                                           | 5,74                          |
| 9         | $\Delta y_{\Delta c_0}$                   | $[1/(2f')] \Delta c_0$                               | 100 мкм                                                         | 29                                             | 0,172                         |
| 10        | $\Delta y_{\Delta \gamma}$                | $(y/2) \Delta \gamma^2$                              | 10'                                                             | 0,01                                           | 500                           |
| 11        | $\Delta y_{\Delta h}$                     | $[1/(2f')] \Delta h$                                 | 1,6 мкм                                                         | 0,46                                           | 10,86                         |
| 12        | $\Delta y_{\Delta d}$                     | $\pm (1/2f') \Delta d$                               | 0,07 мкм                                                        | 0,02                                           | 250                           |
| 13        | $\Delta y_{\Delta c_H}$                   | $[1/(8f' L)] \Delta c_H^2$                           | 200 мкм                                                         | 0,1                                            | 50                            |
| 14        | $\Delta y_{\Delta h_H}$                   | $[1/(8f' L)] \Delta h_H^2$                           | 10 мкм                                                          | 0,0002                                         | 25000                         |

Примечания: 1.  $R = 12,5$  мм — радиус барабана точной шкалы;  $\theta_0$  — начальная фаза вектора эксцентриситета шкалы;  $\Gamma = 15\times$  — увеличение окуляра;  $L = 30$  мм — длина (база) ползуна сетки;  $t = 0,5$  мм — смещение глаза наблюдателя в поперечном направлении. 2. Погрешности 13 и 14 второго порядка малости — только при соблюдении принципа Аббе.



и достигает  $0,1\% f'$ . Отсюда по формуле (2.21) и табл. 2.2 находим  $\lambda_{нк} = 4,16$ . Так как  $\lambda_n > \lambda_{нк} > \lambda_0$ , погрешность уменьшена, однако остаточной недокомпенсацией пренебречь нельзя (т. е.  $\lambda_0^{1к} = \lambda_0$ ). Коэффициент влияния погрешности от зазора в винтовом зацеплении меньше  $\lambda_0^{1к}$ , поэтому необходим второй компенсатор. Компенсация зазора в винтовом зацеплении может быть осуществлена, например, регулировкой зазора с помощью разрезной гайки. По формуле (2.22) и общему выражению частичной погрешности из табл. 2.2 находим, что зазор после регулировки должен быть не более 5,5 мкм.

Таким образом, требуемая точность автоколлиматора достигается с помощью двух компенсаторов, которые позволяют повысить технологичность изделия благодаря расширению допусков на  $\Delta f'$  и  $\Delta c_0$ .

**Расчет компенсаторов призмменного бинокля.** Одним из основных показателей качества призмменного бинокля (рис. 2.2) является параллельность осей пучков лучей, выходящих из окуляров от одной и той же точки предмета наблюдения. Допустимая их непараллельность  $\Delta\alpha$ , например, в вертикальной плоскости составляет  $15'$  (в горизонтальной плоскости допуск составляет  $20'$  при дивергенции осей и  $60'$  при их конвергенции).

Определим число компенсаторов и требования к ним, обеспечивающие заданный показатель качества ( $\Delta d_{ад} = 15'$ ) в призмменном бинокле  $6 \times 30$  при фокусных расстояниях объективов  $f_{об} = 120$  мм и окуляров  $f_{ок} = 20$  мм. Наводка на резкость осуществляется вращением окуляров. На непараллельность осей в вертикальной плоскости влияет, как известно [32], большое количество технологических погрешностей, основные из которых приведены в табл. 2.3.

Значение наименьшего допустимого коэффициента влияния согласно формуле (2.16) составляет  $\lambda_0 = 4,7$ . Результаты расчетов для определения степени частичного влияния первичных погрешностей на непараллельность осей приведены в табл. 2.4, из которой видно, что все погрешности оказывают такое сильное влияние, что требуемой параллельности осей не получить даже при наличии лишь одной из них. Только 17, 18, 21 и 22-я погрешности могли бы не требовать компенсации при условии некоторого ужесточения их допуска.

Компенсация погрешностей в биноклях различных фирм осуществляется по-разному [32]. Не останавливаясь на сравнительном

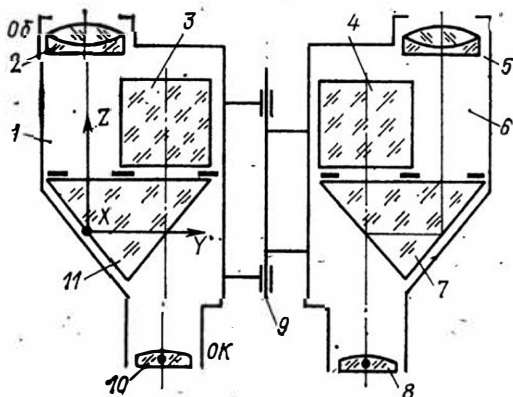


Рис. 2.2. Схема призмменного бинокля:

1 — 1-я трубка бинокля; 2 — объектив 1-й трубки; 3 — призма  $P_1$ ; 4 — призма  $P_2$ ; 5 — объектив 2-й трубки; 6 — 2-я трубка бинокля; 7 — призма  $P_1$ ; 8 — окуляр 2-й трубки; 9 — шарнир; 10 — окуляр 1-й трубки; 11 — призма  $P_2$ .

Таблица 2.3

| № №<br>пп | Первичная погрешность ПП ( $\Delta q$ )                                          | Частичное<br>влияние<br>( $\Delta \alpha_{\Delta q}$ ) $n_z$ |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1         | Погрешность фокусного расстояния объектива первой трубки $\Delta f_1$            | $\Delta \alpha_{\Delta f_1}$                                 |
| 2         | Погрешность фокусного расстояния объектива второй трубки $\Delta f_2$            | $\Delta \alpha_{\Delta f_2}$                                 |
| 3         | Погрешность фокусного расстояния окуляра первой трубки $\Delta f_3$              | $\Delta \alpha_{\Delta f_3}$                                 |
| 4         | Погрешность фокусного расстояния окуляра второй трубки $\Delta f_4$              | $\Delta \alpha_{\Delta f_4}$                                 |
| 5         | Непараллельность геометрических осей трубок $\Delta \delta_1$                    | $\Delta \alpha_{\Delta \delta_1}$                            |
| 6         | Непараллельность оптической оси поворотной трубки оси шарнира $\Delta \delta_2$  | $\Delta \alpha_{\Delta \delta_2}$                            |
| 7         | Децентрировка объектива первой трубки $\Delta e_1$                               | $\Delta \alpha_{\Delta e_1}$                                 |
| 8         | » » второй трубки $\Delta e_2$                                                   | $\Delta \alpha_{\Delta e_2}$                                 |
| 9         | » окуляра первой трубки $\Delta e_3$                                             | $\Delta \alpha_{\Delta e_3}$                                 |
| 10        | » » второй трубки $\Delta e_4$                                                   | $\Delta \alpha_{\Delta e_4}$                                 |
| 11        | Сдвиг ребра призмы $P_2$ вдоль оси $X$ $\Delta p_2$                              | $\Delta \alpha_{\Delta p_2}$                                 |
| 12        | » » » $P'_2$ » » $X$ $\Delta p'_2$                                               | $\Delta \alpha_{\Delta p'_2}$                                |
| 13        | Поворот главного сечения призмы $P_1$ вокруг оси $Y$ $\Delta \varphi_{y1}$       | $\Delta \alpha_{\Delta \varphi_{y1}}$                        |
| 14        | Поворот главного сечения призмы $P'_1$ вокруг оси $Y$ $\Delta \varphi'_{y2}$     | $\Delta \alpha_{\Delta \varphi'_{y2}}$                       |
| 15        | Погрешность прямого угла призмы $P_2$ $\Delta \pi_1$                             | $\Delta \alpha_{\Delta \pi_1}$                               |
| 16        | » » » » $P'_2$ $\Delta \pi_2$                                                    | $\Delta \alpha_{\Delta \pi_2}$                               |
| 17        | Погрешность в острых углах призмы $P_2$ $\Delta e_1$                             | $\Delta \alpha_{\Delta e_1}$                                 |
| 18        | » » » » » $P'_2$ $\Delta e_2$                                                    | $\Delta \alpha_{\Delta e_2}$                                 |
| 19        | Пирамидальность призмы $P_1$ $\Delta \pi_1$                                      | $\Delta \alpha_{\Delta \pi_1}$                               |
| 20        | » » » $P'_1$ $\Delta \pi_2$                                                      | $\Delta \alpha_{\Delta \pi_2}$                               |
| 21        | Неперпендикулярность главных сечений призм Порро первой трубки $\Delta \gamma_1$ | $\Delta \alpha_{\Delta \gamma_1}$                            |
| 22        | Неперпендикулярность главных сечений призм Порро второй трубки $\Delta \gamma_2$ | $\Delta \alpha_{\Delta \gamma_2}$                            |

анализе компенсаторов тех или иных моделей, определим их число и требования к ним.

Анализ первичных погрешностей показывает, что погрешности фокусных расстояний объективов и окуляров, эксцентриситеты окуляров не могут быть компенсированы подвижкой и разворотом призм на мостике или смещением объективов (окуляров). Непараллельность оптической оси поворотной трубки оси шарнира ( $\Delta \delta_2$ ) должна компенсироваться независимо от того, параллельна она или нет оптической оси неподвижной трубки. Погрешности 5, 6, 7, 11

Таблица 2.4

| № №<br>пп | Частич-<br>ное<br>влияние             | Общее выражение<br>частичного влияния<br>$A_q \Delta q$ | Значение<br>первич-<br>ной погреш-<br>ности | Значение<br>частичного<br>влия-<br>ния, ...' | Кэффи-<br>циент<br>влияния $\lambda$ |
|-----------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1         | $\Delta \alpha_{\Delta f_1}$          | $(\Gamma \omega_{об}/f_{об}) \Delta f_1$                | 1,2 мм                                      | 18                                           | 0,83                                 |
| 2         | $\Delta \alpha_{\Delta f_2}$          | $(\Gamma \omega_{об}/f_{об}) \Delta f_2$                | 1,2 мм                                      | 18                                           | 0,83                                 |
| 3         | $\Delta \alpha_{\Delta f_3}$          | $(\Gamma \omega_{об}/f_{ок}) \Delta f_3$                | 0,4 мм                                      | 36                                           | 0,41                                 |
| 4         | $\Delta \alpha_{\Delta f_4}$          | $(\Gamma \omega_{об}/f_{ок}) \Delta f_4$                | 0,4 мм                                      | 36                                           | 0,41                                 |
| 5         | $\Delta \alpha_{\Delta \delta_1}$     | $(\Gamma - 1) \Delta \delta_1$                          | 10'                                         | 50                                           | 0,3                                  |
| 6         | $\Delta \alpha_{\Delta \delta_2}$     | $\sin \beta \Delta \delta_2 (\Gamma - 1)$               | 20'                                         | 100                                          | 0,15                                 |
| 7         | $\Delta \alpha_{\Delta e_1}$          | $\Delta e_1/f_{ок}$                                     | 0,1 мм                                      | 16,6                                         | 0,9                                  |
| 8         | $\Delta \alpha_{\Delta e_2}$          | $\Delta e_2/f_{ок}$                                     | 0,1 мм                                      | 16,6                                         | 0,9                                  |
| 9         | $\Delta \alpha_{\Delta e_3}$          | $\Delta e_3/f_{ок}$                                     | 0,1 мм                                      | 16,6                                         | 0,9                                  |
| 10        | $\Delta \alpha_{\Delta e_4}$          | $\Delta e_4/f_{ок}$                                     | 0,1 мм                                      | 16,6                                         | 0,9                                  |
| 11        | $\Delta \alpha_{\Delta p_1}$          | $2\Delta P_1/f_{ок}$                                    | 0,2 мм                                      | 66                                           | 0,22                                 |
| 12        | $\Delta \alpha_{\Delta p_2}$          | $2\Delta P_2/f_{ок}$                                    | 0,2 мм                                      | 66                                           | 0,22                                 |
| 13        | $\Delta \alpha_{\Delta \varphi_{y1}}$ | $(2x_1/f_{ок}) \Delta \varphi_{y1}$                     | 5'                                          | 40                                           | 0,375                                |
| 14        | $\Delta \alpha_{\Delta \varphi_{y2}}$ | $(2x_1/f_{ок}) \Delta \varphi_{y2}$                     | 5'                                          | 40                                           | 0,375                                |
| 15        | $\Delta \alpha_{\Delta p_1}$          | $(2nx_2/f_{ок}) \Delta p_1$                             | 2'                                          | 15                                           | 1                                    |
| 16        | $\Delta \alpha_{\Delta p_2}$          | $(2nx_2/f_{ок}) \Delta p_2$                             | 2'                                          | 15                                           | 1                                    |
| 17        | $\Delta \alpha_{\Delta e_1}$          | $(2D_{св. п}/f_{ок}) \Delta e_1$                        | 2'                                          | 4                                            | 3,75                                 |
| 18        | $\Delta \alpha_{\Delta e_2}$          | $(2D_{св. п}/f_{ок}) \Delta e_2$                        | 2'                                          | 4                                            | 3,75                                 |
| 19        | $\Delta \alpha_{\Delta \pi_1}$        | $(2nx_1/f_{ок}) \Delta \pi_1$                           | 2'                                          | 24                                           | 0,51                                 |
| 20        | $\Delta \alpha_{\Delta \pi_2}$        | $(2nx_1/f_{ок}) \Delta \pi_2$                           | 2'                                          | 24                                           | 0,51                                 |
| 21        | $\Delta \alpha_{\Delta \gamma_1}$     | $2\omega_{ок} \Delta \gamma_1$                          | 5'                                          | 5,2                                          | 2,88                                 |
| 22        | $\Delta \alpha_{\Delta \gamma_2}$     | $2\omega_{ок} \Delta \gamma_2$                          | 5'                                          | 5,2                                          | 2,88                                 |

Примечание.  $\Gamma = 6\times$  — увеличение бинокля;  $\omega_{об} = 5^\circ$  — угол поля зрения объектива;  $\omega_{ок} = 30^\circ$  — угол поля зрения окуляра;  $\beta \approx 90^\circ$  — максимальный угол поворота поворотной трубки;  $n \approx 1,5$  — показатель преломления материала призмы;  $x_1 \approx 80$  мм,  $x_2 \approx 50$  мм — расстояния от приведенного ребра призм 7, 11 и 3, 4 до переднего фокуса окуляра;  $D_{св. п}$  — световой диаметр призмы.

13, 15, 17, 19 (см. табл. 2.3 и 2.4) подвижной трубки так же как и погрешности 8, 12, 14, 16, 18, 20 неподвижной трубки могут быть компенсированы одним компенсатором.

Введем первый компенсатор, устанавливающий оптическую ось поворотной трубки параллельно оси шарнира. Это можно сделать, например, смещением призмы  $P_2$  вдоль оси  $X$ , поворотом главного сечения призмы  $P_1$  вокруг оси  $Y$ , сдвигом объектива или окуляра вдоль оси  $X$ , регулировкой шарнира.

Согласно формулам (2.21) и (2.22) максимальное значение недокомпенсации этой погрешности  $\Delta \alpha_{н\max} = 3,2'$ , а минимальное

значение, позволяющее считать эту погрешность полностью компенсированной,  $\Delta\alpha_{\text{нк min}} \approx 1'$  (приблизительно принимаем  $\lambda_n \approx 3\lambda_0$ ). В первом случае погрешности 5, 6, 7, 11, 13, 15, 17 и 19 заменяются одной (так как недокомпенсацией мы пренебречь не можем) и тогда  $\lambda_0^{1\text{к}} = 3,87$ , во втором случае эти погрешности полностью исключаются из формулы для расчета  $\lambda_0^{1\text{к}}$  и тогда  $\lambda_0^{1\text{к}} = 3,74$ . Рассмотрим случай, когда  $\lambda_0^{1\text{к}} = 3,87$ . Он позволяет расширить требования к чувствительности компенсатора в три раза по сравнению со случаем, когда  $\lambda_0^{1\text{к}} = 3,74$ . Если эту компенсацию мы будем осуществлять подвижной призмы  $\Pi_2$  вдоль оси  $X$ , то тогда чувствительность этой подвижки определим из выражения

$$\Delta p_2 \text{ min} = \Delta\alpha_{\text{нк max}} f'_{\text{ок}}/2 \approx 10 \text{ мкм.}$$

Если компенсация осуществляется поворотом главного сечения призмы  $\Pi_1$  вокруг оси  $Y$ , то чувствительность разворота найдем следующим образом:

$$\Delta\varphi_{y1 \text{ min}} = \Delta\alpha_{\text{нк max}} f'_{\text{ок}}/(2x_1) \approx 0,4'.$$

При компенсации погрешности сдвигом объектива или окуляра его чувствительность  $\Delta e_{\text{тин}} = f'_{\text{ок}} \Delta\alpha_{\text{нк max}} = 19 \text{ мкм.}$  При компенсации погрешности регулировкой шарнира чувствительность его разворота  $\Delta\varphi_{\text{ш min}} \approx 0,6'$ . Так как остаются погрешности с  $\lambda_i < \lambda_0^{1\text{к}}$ , вводим второй компенсатор, предназначенный для устранения непараллельности оптической оси неподвижной трубки оптической оси подвижной трубки. Компенсация может быть осуществлена вышеперечисленными методами за исключением регулировки шарнира. Максимальное значение недокомпенсаций при этом будет равно  $\Delta\alpha_{\text{нк2 max}} = \Delta\alpha_{\text{од}}/\lambda_0^{1\text{к}} = 4,1'$ ; чувствительность —  $\Delta p'_{2 \text{ min}} \approx 13 \text{ мкм.}$   $\Delta\varphi'_{y2 \text{ min}} \approx 0,5'$ ;  $\Delta e'_{\text{min}} \approx 24 \text{ мкм.}$   $\lambda_0^{2\text{к}} = 2,82$ . Сравнение коэффициентов влияния погрешностей 21 и 22 со значением  $\lambda_0^{2\text{к}}$  показывает, что эти погрешности уже не требуют компенсации.

Компенсация погрешностей фокусных расстояний объективов и окуляров, приводящих к разности увеличений трубок, может быть осуществлена либо их комплектацией, либо регулировкой фокусного расстояния одного из них. При компенсации максимальное значение погрешности фокусного расстояния объектива в группе, либо его изменение при регулировке должно составить  $\Delta f'_{\text{об. нк}} = \Delta\alpha_{\text{од}} f'_{\text{об}}/(\Gamma\omega_{\text{об}}\lambda_0^{2\text{к}}) \approx 0,35 \text{ мм,}$  а окуляра —  $\Delta f'_{\text{ок. нк}} = \Delta\alpha_{\text{од}} \times \times f'_{\text{ок}}/(\Gamma\omega_{\text{об}}\lambda_0^{2\text{к}}) \approx 0,06 \text{ мм.}$  Коэффициент  $\lambda_0^{3\text{к}} = 2,23$ . Децентрировка каждого окуляра влияет на непараллельность осей так сильно, что требуется их компенсация. Компенсацию можно осуществить либо конструктивным центрированием окуляра относительно резьбы патрубков, либо результирующей технологической обработкой корпуса окуляра от его оптической оси. В обоих случаях остаточная децентрировка не должна превосходить значения  $\Delta e'_{\text{ок. нк}} = f'_{\text{ок}} \Delta\alpha_{\text{од}}/\lambda_0^{3\text{к}} \approx 40 \text{ мкм.}$

Таким образом, требуемый показатель качества бинокля достигается применением по крайней мере пяти компенсаторов. Бинокли, выпускаемые в СССР, содержат в основном семь компенсаторов, так как установка оптической оси подвижной трубки параллельно оси шарнира и установка параллельности оптических осей достигается не двумя, а четырьмя компенсаторами: грубо — подвижкой призмы на мостике и точно — смещением объективов. Компенсаторы призмённого бинокля позволяют не только получить требуемую параллельность осей, но и расширить допуск на большинство первичных погрешностей, что существенно повышает технологичность изготовления бинокля.

**Расчет компенсаторов спектральной щелевой диафрагмы.** К спектральным щелевым диафрагмам предъявляются высокие требования к точности изменения ширины щели и ее форме (клиновидности и погрешностям формы образующих ее кромок ножей).

Приведем расчет компенсаторов, обеспечивающих указанные требования в щелевой диафрагме, созданной на базе унифицированной диафрагмы типа ГОИ, но с несколько измененными пределами работы. Пределы раскрытия щели диафрагмы составляют 0—3 мм; допустимое предельное вероятное значение погрешности щели на всем диапазоне — 5 мкм; клиновидность щели — 1 мкм.

Кинематическая схема диафрагмы изображена на рис. 1.32. Изменение ширины ( $y$ ) щели здесь происходит при перемещении ножей 4, опирающихся на плоский кулачок (клинья) 3 ползуна 2. Ползун перемещается винтовым механизмом 1 при вращении ( $x$ ) барабанчика со шкалой.

Искомая ширина щели связана следующей зависимостью с конструктивными параметрами узла:

$$y = kp \operatorname{tg} \beta x / \pi = 2kp \operatorname{tg} \beta n / n_r,$$

где  $k = 1$  — число заходов винта;  $p$  — шаг винта;  $\beta$  — угол клина,  $\beta = 14^\circ 2'$ ;  $x$  — угол поворота точной шкалы (максимальный угол поворота  $x_{\max} = 6 \cdot 2\pi$ ;  $n$  — угол поворота точной шкалы в делениях,  $n_{\max} = n_r n_t = 600$  ( $n_r = 6$  — число делений грубой шкалы,  $n_t = 100$  — число делений точной шкалы). Цена деления точной шкалы  $A_t = 5$  мкм; цена деления грубой шкалы  $A_r = 0,5$  мм.

В табл. 2.5 приведены основные первичные погрешности, влияющие на точность раскрытия щели диафрагмы. Значение наименьшего допустимого коэффициента влияния согласно формуле (2.16) равно  $\lambda_0 = 7,4$ . Как видно из табл. 2.6, к ничтожно малым могут быть отнесены погрешности 1, 3, 8, 10, 12. Проверку правильности их отнесения к ничтожно малым производим с помощью коэффициента  $\lambda_n = 42,2$ , вычисленного по формуле (2.18) при  $a = 0,9$ . Сравнение коэффициентов влияния указанных погрешностей со значением  $\lambda_n$  показывает, что лишь только погрешности 8 и 10 могут не учитываться при расчетах. Так как допуск на погрешность 3 может быть уменьшен в два раза (до  $5''$ ), то эту погрешность тоже можно не учитывать при расчетах.

Таблица 2.5

| №№<br>пп | Первичная погрешность (ПП)                                        | Частичные погрешности<br>$\Delta y_{\Delta q}$ |                              |                                     |
|----------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
|          |                                                                   | $n_c$                                          | $n_1$                        | $n_2$                               |
| 1        | Погрешность совмещения штриха шкалы с индексом $\Delta\alpha$     | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta\alpha}$           |
| 2        | Погрешность совмещения штриха шкалы из-за параллакса $\Delta\rho$ | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta\rho}$             |
| 3        | Погрешность деления точной шкалы $\Delta\varphi_1$                | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta\varphi_1}$        |
| 4        | Эксцентриситет точной шкалы $\Delta e$                            | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta e}$               |
| 5        | Перекося барабанчика точной шкалы $\Delta\gamma$                  | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta\gamma}$           |
| 6        | Погрешность шага винта $\Delta t$                                 | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta t}$               |
| 7        | Зазор в паре винт—гайка $\Delta c_0$                              | —                                              | $\Delta y_{\Delta c_0}$      | —                                   |
| 8        | Непараллельность перемещений винта и ползуна $\Delta\varphi_2$    | —                                              | $\Delta y_{\Delta\varphi_2}$ | —                                   |
| 9        | Погрешность формы поверхностей высшей пары винт—ползун $\Delta h$ | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta h}$               |
| 10       | Изменение контактной деформации пары винт—ползун $\Delta d$       | $\Delta y_{\Delta d}$                          | —                            | —                                   |
| 11       | Зазор в направляющих ползуна $\Delta c_1$                         | —                                              | $\Delta y_{\Delta c_1}$      | —                                   |
| 12       | Погрешность формы направляющих и ползуна $\Delta h_1$             | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta h_1}$             |
| 13       | Погрешность угла левого клина $\Delta\beta_{\text{л}}$            | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta\beta_{\text{л}}}$ |
| 14       | Погрешность угла правого клина $\Delta\beta_{\text{п}}$           | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta\beta_{\text{п}}}$ |
| 15       | Погрешность формы поверхности левого клина $\Delta h_2$           | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta h_2}$             |
| 16       | Погрешность формы поверхности правого клина $\Delta h_3$          | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta h_3}$             |
| 17       | Зазор в направляющих левого ножа $\Delta c_2$                     | —                                              | $\Delta y_{\Delta c_2}$      | —                                   |
| 18       | Зазор в направляющих правого ножа $\Delta c_3$                    | —                                              | $\Delta y_{\Delta c_3}$      | —                                   |
| 19       | Погрешность формы направляющих и левого ножа $\Delta h_4$         | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta h_4}$             |
| 20       | Погрешность формы направляющих и правого ножа $\Delta h_5$        | —                                              | —                            | $\Delta y_{\Delta h_5}$             |

Уточненное значение коэффициента  $\lambda_0$ , равное 5,74, находим из формулы (2.20), после чего определяем, что погрешности 6, 7, 11, 13, 14, 15, 16, 17 и 18 требуют компенсации. Выполнить это одним компенсатором невозможно (вследствие малого хода винта возможна лишь частичная взаимокompенсация погрешностей углов клиньев и накопленной погрешности шага винта).

Начнем с компенсации наиболее сильно действующих погрешностей 11, 17 и 18. Исходя из выражения (2.22), определяем, что наибольшее значение недокомпенсации погрешностей 17 и 18 со-

Таблица 2.6

| № №<br>пп. | Частич-<br>ная по-<br>греш-<br>ность<br>$\Delta y_{\Delta q}$ | Общее выражение<br>частичной погреш-<br>ности $\Delta y_{\Delta q} = A_q \Delta q$ | Значение<br>ПП   | Значение<br>частичной<br>погреш-<br>ности, мкм | Кoeffи-<br>циент<br>влияния $\lambda$ |
|------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 1          | $\Delta y_{\Delta \alpha}$                                    | $(A_T 250/l) \Delta \alpha$                                                        | 30"              | 0,187                                          | 26,7                                  |
| 2          | $\Delta y_{\Delta p}$                                         | $[A_T t/(l 250)] \Delta p$                                                         | 0,5 мм           | 0,5                                            | 10                                    |
| 3          | $\Delta y_{\Delta \varphi_1}$                                 | $(y/x) \Delta \varphi_1$                                                           | 10'<br>(5')      | 0,23<br>(0,115)                                | 21,7<br>(43,4)                        |
| 4          | $\Delta y_{\Delta e}$                                         | $[y \sin(x + \theta_0)/(xR)] \Delta l$                                             | 125 мкм          | 0,765                                          | 6,5                                   |
| 5          | $\Delta y_{\Delta \gamma}$                                    | $[y \sin(x + \theta_0) L/(xR)] \Delta \gamma$                                      | 10'              | 0,293                                          | 17,0                                  |
| 6          | $\Delta y_{\Delta t}$                                         | $2 \operatorname{tg} \beta \Delta t$                                               | 2 мкм<br>(3)     | 1,0<br>(1,5)                                   | 5<br>(3,33)                           |
| 7          | $\Delta y_{\Delta c_0}$                                       | $2 \operatorname{tg} \beta \Delta c_0$                                             | 50 мкм           | 25                                             | 0,2                                   |
| 8          | $\Delta y_{\Delta \varphi_2}$                                 | $(-y/2) \Delta \varphi_2^2$                                                        | 20'              | 0,054                                          | 92,5                                  |
| 9          | $\Delta y_{\Delta h}$                                         | $2 \operatorname{tg} \beta \Delta h$                                               | 1,6 мкм          | 0,8                                            | 6,25                                  |
| 10         | $\Delta y_{\Delta d}$                                         | $2 \operatorname{tg} \beta \Delta d$                                               | 0,2 мкм          | 0,1                                            | 50                                    |
| 11         | $\Delta y_{\Delta c_1}$                                       | $(b \operatorname{tg} \beta/B_1) \Delta c_1$                                       | 150 мкм          | 10,7                                           | 0,46                                  |
| 12         | $\Delta y_{\Delta h_1}$                                       | $(b \operatorname{tg} \beta/B_1) \Delta h_1$                                       | 3,2 мкм          | 0,228                                          | 21,9                                  |
| 13         | $\Delta y_{\Delta \beta_{\Pi}}$                               | $[xkp/(\pi \cos^2 \beta)] \Delta \beta_{\Pi}$                                      | 10'              | 3,82                                           | 1,3                                   |
| 14         | $\Delta y_{\Delta \beta_{\Pi}}$                               | $[xkp/(\pi \cos^2 \beta)] \Delta \beta_{\Pi}$                                      | 10'              | 3,82                                           | 1,3                                   |
| 15         | $\Delta y_{\Delta h_2}$                                       | $(1/\cos \beta) \Delta h_2$                                                        | 1,6 мкм          | 1,64                                           | 3,0                                   |
| 16         | $\Delta y_{\Delta h_3}$                                       | $(1/\cos \beta) \Delta h_3$                                                        | 1,6 мкм          | 1,64                                           | 3,0                                   |
| 17         | $\Delta y_{\Delta c_2}$                                       | $(\operatorname{tg} \beta) \Delta c_2$                                             | 220 мкм          | 55                                             | 0,09                                  |
| 18         | $\Delta y_{\Delta c_3}$                                       | $(\operatorname{tg} \beta) \Delta c_3$                                             | 220 мкм          | 55                                             | 0,09                                  |
| 19         | $\Delta y_{\Delta h_4}$                                       | $(L_1 \operatorname{tg} \beta/B_2) \Delta h_4$                                     | 3,2 мкм<br>(0,5) | 0,39<br>(0,06)                                 | 12,8<br>(83,3)                        |
| 20         | $\Delta y_{\Delta h_5}$                                       | $(L_1 \operatorname{tg} \beta/B_2) \Delta h_5$                                     | 3,2 мкм<br>(0,5) | 0,39<br>(0,06)                                 | 12,8<br>(83,3)                        |

Примечание:  $l \approx 1$  мм — расстояние между штрихами точной шкалы;  $t \approx 50$  мм — возможное смещение глаз наблюдателя;  $R \approx 13$  мм — радиус барабана точной шкалы;  $\theta_0$  — начальная фаза вектора эксцентриситета шкалы;  $L \approx 16$  мм — расстояние от края барабана до точки поворота;  $b \approx 10$  мм — вылет клина;  $B_1 \approx 35$  мм — база ползуна;  $L_1 \approx 10$  мм — расстояние от центра поворота ножа до его опоры на клин;  $B_2 \approx 20$  мм — база ножа.

ставляет  $\Delta c_{\text{нк max}} = \Delta y_{vd}/(\operatorname{tg} \beta \lambda_0) \approx 3,5$  мкм, а погрешности 11 —  $\Delta c_{\text{нк max}} = \Delta y_{vd}/(b \operatorname{tg} \beta/B_1) \lambda_0 \approx 12,5$  мкм. Если эти погрешности компенсировать силовым замыканием (см. п. 1.5), то  $\Delta c_{\text{нк}} = 0$ . Тогда, применив три компенсатора, получим  $\lambda_0^{3\text{к}} = 4,1$ . Следовательно, погрешность 6 уже не требует компенсации.

Максимальное значение недокомпенсации следующей значительно влияющей погрешности 7 составляет  $\Delta c_{0, \text{нк max}} = \Delta y_{vd}/(2 \operatorname{tg} \beta \lambda_0^{3\text{к}}) \approx$

$\approx 2,4$  мкм. Если применить регулировку зазора обжимной гайкой (как в типовой конструкции), то уменьшить значение  $\Delta c_{0, \text{нк}}$  не удастся из-за погрешности шага винта (т. е.  $\lambda_0^{4\kappa} = \lambda_0^{3\kappa} = 4,1$ ).

Погрешности углов клиньев (13 и 14) регулируют путем их разворота относительно ползуна. Максимальное значение недокомпенсации составляет  $\Delta \beta_{\text{нк max}} = \Delta y_{\text{vd}} / [(xkp / (\pi \cos^2 \beta)) \lambda_0^{4\kappa}] \approx 3'$ . Тогда  $\lambda_0^{6\kappa} = \lambda_0^{4\kappa} = 4,1$ . Минимальное значение недокомпенсации, позволяющее не учитывать эти погрешности, равно  $\Delta \beta_{\text{нк min}} = \Delta y_{\text{vd}} / [(xkp / (\pi \cos^2 \beta)) \lambda_{\text{н}}] \approx 0,3'$ . В этом случае  $\lambda_0^{6\kappa} \approx 3,85$ . В обоих случаях остаются погрешности, требующие компенсации. Выбираем вариант с  $\lambda_0^{6\kappa} = 4,1$ , так как он позволяет более просто осуществить регулировку углов клиньев.

Погрешности формы поверхностей 15 и 16 устраняются обычно их доводкой. Допустимая погрешность формы равна  $\Delta h_{2,3 \text{нк}} = \Delta y_{\text{vd}} / [(1/\cos \beta) \lambda_0^{6\kappa}] \approx 1,2$  мкм. Этот допуск с учетом небольшой базовой длины кромки может быть выдержан тонкой шлифовкой.

Проведенный расчет компенсаторов позволяет обеспечить с их помощью заданную точность функционирования щели. На клиновидность щели  $\Delta K_{\text{щ}}$  влияют погрешность прямых углов ножей  $\Delta \alpha$  (см. рис. 1.37) и погрешности формы их направляющих  $\Delta h_4$  и  $\Delta h_5$ :

$$\Delta K_{\text{щ}} \Delta \alpha = H \Delta \alpha; \quad \Delta K_{\text{щ}} \Delta h_{4,5} = (H/B_2) \Delta h_{4,5},$$

где  $H = 20$  мм — рабочая высота ножей.

Так как эти погрешности относятся к группе  $n_2$ , то  $\lambda_0 = 2$ . Исходя из допустимой клиновидности  $\Delta K_{\text{щ vd}} = 1$  мкм, находим допустимые значения первичных погрешностей:  $\Delta \alpha_{1,2} = \Delta K_{\text{щ vd}} / (H \lambda_0) = 5''$ ;  $\Delta h_{4,5} = \Delta K_{\text{щ vd}} / [(H/B_2) \lambda_0] = 0,5$  мкм. Выдержать такие допуски технологически весьма трудно, поэтому производят компенсацию погрешностей. Погрешность прямого угла ножей  $\Delta \alpha$  компенсируют путем ориентирования их рабочих кромок параллельно друг другу разворотом направляющих (см. рис. 1.37). Допуск на погрешность выполнения прямого угла при изготовлении ножей может быть расширен до экономического уровня точности. Возникающая при таком методе компенсации косинусная погрешность раскрытия щели мала и ею можно пренебречь.

Погрешность формы  $\Delta h_4$ ,  $\Delta h_5$  направляющих ножей, приводящая к их переменным наклонам при движении, устраняется доводкой. Рабочие кромки ножей также доводятся и контролируются пробным стеклом.

Рассмотренные примеры показывают, что введение компенсаторов позволяет расширить допуски не только на компенсируемые, но и на другие погрешности.

#### 2.4. УТОЧНЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРВИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Правильное определение допустимых значений первичных погрешностей имеет весьма важное значение, так как от этого зависит назначение допусков на технологические первичные погрешности,



а следовательно, технологичность прибора. Допустимые значения влияющих факторов позволяют уточнить условия эксплуатации прибора и оптимизировать его конструктивные параметры.

Например, если погрешность совмещения штриха точной шкалы щелевой диафрагмы из-за параллакса (см. табл. 2.6) нарушала бы требуемую точность работы, то пришлось бы изменить конструкцию шкального отсчетного устройства (для уменьшения параллакса) либо каким-то образом уменьшить или устранить возможное смещение глаз наблюдателя в поперечном направлении.

Допустимые значения первичных погрешностей и факторов определяют при выполнении проектного расчета из условия равного влияния их частичных погрешностей (влияний) [18], т. е. при  $\lambda_{ci} = \lambda_{1i} = \lambda_{2i} = \lambda_0$ . Следовательно, исходя из (2.9)—(2.11), можно получить:

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_{ci} &= \Delta y_{vd}/(A_{qi}\lambda_0); \\ \delta q_{1i} &= \Delta y_{vd}/[A_{ci}(C_{pi} + k_{pi})\lambda_0]; \\ \delta q_{2i} &= \Delta y_{vd}/(A_{ci}k_{pi}\lambda_0), \end{aligned} \right\} \quad (2.30)$$

где  $\Delta q_c$ ,  $\delta q_1$ ,  $\delta q_2$  — допустимые значения неслучайных первичных погрешностей и случайных, имеющих и не имеющих систематическую составляющую соответственно;  $\lambda_0$  — наименьшее допустимое значение коэффициента влияния, вычисленное по формулам (2.14) или (2.16).

Как видно из этих выражений, допустимые значения первичных погрешностей зависят не только от их передаточной функции (коэффициентов)  $A_q$  ( $A_c$ ), но и от числа погрешностей (т. е. от  $\lambda_0$ ). Однако среди них есть погрешности, влияющие очень слабо на показатель качества прибора (узла), что приводит при условии равенства их частичных влияний к некоторому ужесточению допусков на другие погрешности и, как следствие, иногда к неоправданной их компенсации. Первое уточнение допустимых значений первичных погрешностей производят при выявлении ничтожно малых погрешностей и факторов с помощью коэффициента  $\lambda_n$ , вычисленного по формуле (2.18). В том случае, когда отсутствуют неслучайные погрешности (или они учтены отдельно), а число ничтожно малых из группы  $n_1$  равно нулю, наименьший допустимый коэффициент влияния может быть определен по формуле (2.19). Исключив ничтожно малые погрешности (т. е. такие, у которых  $\lambda_i \geq \lambda_n$ ), пересчитывают по формуле (2.20) значение  $\lambda_0$ . Уточненное значение  $\lambda_0$  подставляют в выражение (2.30) и получают новые (расширенные) допуски на первичные погрешности и факторы.

Далее выявляют погрешности, требующие компенсации, определяют число компенсаторов по вышеизложенной методике и находят значение  $\lambda_0^*$ , вычисленное по формуле (2.20) с учетом того, что часть компенсируемых погрешностей перейдет в группу ничтожно малых погрешностей.

После этого вторично уточняют допустимые значения первичных погрешностей и факторов:

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_{ci} &= \Delta y_{vd} / (A_{qi} \lambda_0^{k \cdot k}); \\ \delta q_{1i} &= \Delta y_{vd} / [A_{ci} (C_{pi} + k_{pi}) \lambda_0^{k \cdot k}]; \\ \delta q_{2i} &= \Delta y_{vd} / (A_{ci} k_{pi} \lambda_0^{k \cdot k}). \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

Однако приведенное уточнение допусков может быть не окончательным. Среди первичных погрешностей (особенно технологических) встречаются такие, допуски на которые являются весьма жесткими. Их можно выполнить, но с точки зрения экономичности целесообразно расширить допуск на них за счет более слабо влияющих ошибок. Примером такого допуска является допуск на погрешность шага винта в винтовом механизме спектральной щели (см. табл. 2.6). Выдержать допуск, равный 2 мкм, весьма сложно, компенсация же этой погрешности принципиально возможна, но в данном устройстве экономически и технически нецелесообразна. Вместе с тем некоторые погрешности оказывают гораздо более слабое влияние (например, 1 и 5). Кроме этого, для обеспечения другого показателя качества (в нашем примере — клиновидности щели) допуски на некоторые первичные погрешности иногда ужесточаются, либо компенсируются (погрешности 19 и 20), в результате чего они переходят в разряд слабо влияющих или ничтожно малых для первого показателя (точности раскрытия щели). Заметим, что вследствие полной компенсации некоторых погрешностей уменьшается также значение коэффициента  $\lambda_n$  (для щелевой диафрагмы это приводит, например, к тому, что погрешность совмещения штриха с индексом из-за ограничения остроты зрения оператора может быть также отнесена к ничтожно малым). Расширение допуска на сильно влияющие погрешности после указанного уточнения производится двумя методами. Первый из них основан на некотором ужесточении допуска на слабо влияющие погрешности (например, изготовление детали не на экономическом, а на производственном уровне точности). В этом случае влияние данных погрешностей становится ничтожно малым и они не учитываются при расчете уточненного значения  $\lambda_0^{k \cdot k \cdot y}$ . Окончательные допуски находят по формуле (2.31), подставляя вместо  $\lambda_0^{k \cdot k}$  его уточненное значение. В щелевой диафрагме, например, можно ужесточить допуски на перекося барабанчика (до 5—8') и погрешность формы ползуна (до 2—2,5 мкм). Тогда учитывая, что погрешности 19, 20, 1, 5, 12 являются ничтожно малыми, получаем уточненное значение  $\lambda_0^{k \cdot k \cdot y} \approx 3,5$ .

Второй метод расширения допусков основан на проверочном расчете показателя качества по формуле (2.8), в которую подставляют значения первичных погрешностей, полученных из выражения (2.31). Поскольку суммарное влияние первичных погрешностей будет меньше, чем  $\Delta y_{vd}$  (так как  $\lambda_0^{k \cdot k} < \lambda_0^*$ ), то допуски на некоторые из них можно расширить. В некоторых случаях допуски перераспределяются: сужаются на слабо влияющие (при этом их перевод

в ничтожно малые необязателен) и расширяются на сильно влияющие погрешности.

Применение этого метода определения допустимых значений первичных погрешностей и факторов, основанного на методике проектного расчета (с учетом компенсаторов) и дальнейшим их перераспределением и уточнением на основе проверочного расчета, следует, видимо, считать наиболее эффективным.

## 2.5. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКА НА ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА МЕЖДУ ЕГО ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Часто ОП представляет собой сложную систему, содержащую большое количество простых и сложных функциональных устройств, поэтому расчет компенсаторов целесообразно проводить отдельно для каждого функционального устройства, а не для всего прибора в целом. Это обусловлено тем, что на этапе проектирования конструкции отдельных узлов прибора бывают разработаны еще недостаточно (что затрудняет проведение расчетов всего прибора), а также тем, что в последнее время существует тенденция агрегатного проектирования, когда прибор komponуется из отдельных функциональных законченных (иногда унифицированных) узлов.

Для расчетов компенсаторов в функциональных устройствах необходимо распределить суммарный допуск на интересующий нас показатель качества прибора между ними. Это можно выполнить несколькими способами.

1-й способ основан на предположении, что все функциональные устройства влияют случайно и одинаково на показатель качества

$$\Delta y_{vd} = \sqrt{\sum_i^n \Delta_i^2} = \Delta_i \sqrt{n},$$

где  $\Delta y_{vd}$  — допустимое значение показателя качества прибора (суммарный допуск);  $n$  — число устройств;  $\Delta_i$  — допуск на отдельное функциональное устройство. Тогда  $\Delta_i = \Delta y_{vd} / \sqrt{n}$ . При таком распределении допуска не учитывается то, что функциональные устройства влияют на показатель качества неодинаково, а в соответствии с коэффициентом влияния.

2-й способ распределения основан на том, что суммарный допуск распределяется между влияниями функциональных устройств пропорционально их коэффициенту влияния [23]:

$$\Delta y_{vd} = \Delta y_{vd} K_1 \left| \sum_i^n K_i \right| + \Delta y_{vd} K_2 \left| \sum_i^n K_i \right| + \dots + \Delta y_{vd} K_n \left| \sum_i^n K_i \right|,$$

где  $K$  — коэффициент влияния устройства;  $\Delta y_{vd} K_i \left| \sum_i^n K_i \right| = \Delta y_{vd} K_i \left| \sum_i^n K_i \right| = \Delta_i K_i$  (частичное) влияние отдельного функционального устройства ( $\Delta_i$  — допуск на устройство).

Допуски на функциональные устройства также получаются одинаковыми (но с учетом их коэффициентов влияния)

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_i = \Delta y_{vd} \sqrt{\sum_i^n K_i}.$$

При условии случайного влияния функциональных устройств имеем

$$\Delta y_{vd} = \sqrt{\sum_i^n \Delta_i^2 K_i^2} = \Delta_i \sqrt{\sum_i^n K_i^2},$$

отсюда  $\Delta_i = \Delta y_{vd} \sqrt{\sum_i^n K_i^2}.$

Равнозначное распределение допуска между функциональными устройствами обладает тем недостатком, что в случае сильного влияния некоторых устройств допуск на все устройства получается жестким. Здесь суммарный допуск достигается за счет более точного изготовления слабовлияющих устройств. Так как затраты на выполнение допуска устройства аналогично затратам на выдерживание допусков деталей возрастают пропорционально квадратам допусков, то такой метод распределения не всегда эффективен.

3-й способ распределения основан на том, что суммарный допуск распределяется равнозначно между частичными влияниями функциональных устройств

$$\Delta y_{vd} = \sqrt{\sum_i^n (\Delta_i K_i)^2} = \Delta_i K_i \sqrt{n},$$

где  $\Delta_1 K_1 = \Delta_2 K_2 = \Delta_n K_n$  — частичные влияния функциональных устройств. Следовательно,  $\Delta_i = \Delta y_{vd} / (K_i \sqrt{n})$ .

В соответствии с различными значениями коэффициентов влияния допуски на функциональные устройства здесь получаются разными. Такое распределение более рационально, так как позволяет выделить устройства, влияющие наиболее сильно, и выдерживать допуск на них, применяя специальные мероприятия: компенсацию погрешностей, использование специализированного оборудования, контрольно-юстировочных приспособлений.

4-й способ распределения суммарного допуска между функциональными устройствами основан на учете затрат, связанных с выполнением допусков. Допуск распределяется так, чтобы с одной стороны обеспечить требуемый показатель качества ОП, а с другой, — наименьшую стоимость его изготовления:

$$\left. \begin{aligned} \sqrt{\sum_i^n \Delta_i^2 K_i^2} &= \Delta y_{vd}; \\ \sum_i^n C_i / \Delta_i^{2p} &= \min, \end{aligned} \right\}$$

где  $C_i$  — коэффициент пропорциональности для выражения допуска в единицах стоимости;  $p > 0$  — показатель степени.

При решении этой системы ( $C_i = 1$ ,  $p = 1$ ) получим [13]

$$\Delta_i = \Delta y_{\text{од}} \sqrt{K_i \sum_i^n K_i}.$$

Распределение допусков на функциональные узлы 3-м и 4-м способами считается наиболее оптимальным. Вопрос о выборе того или иного способа распределения суммарного допуска зависит от вида устройства, степени унификации его, условий производства.

Все перечисленные способы часто используют для распределения допусков на детали прибора (т. е. технологические первичные погрешности). При этом следует обратить внимание на то, что при распределении допуска 4-м способом обычно учитывают только затраты, связанные с изготовлением деталей. Затраты на их сборку или не учитывают или считают, что стоимость сборки обратно пропорциональна квадратам допусков на погрешности сборки. Между допусками на изготовление деталей и стоимостью их сборки имеется корреляционная зависимость. Для сборки многих деталей, особенно тех, которые образуют размерную цепь с одинаковыми коэффициентами влияния погрешностей (например, при  $K = 1$ ), затраты на сборку возрастают с расширением допуска на погрешности изготовления собираемых деталей.

На рис. 2.3 представлены зависимости стоимости  $B$  изготовления и сборки таких деталей от допусков  $\Delta q$  на их изготовление [54]. Как видно из графиков, имеется оптимальная зона допусков на погрешности изготовления деталей, учитывающая затраты и на изготовление и на сборку. Это следует иметь в виду при распределении допусков с учетом затрат, связанных с их обеспечением. Заметим, что в случае применения компенсаторов стоимость сборки в меньшей степени зависит от погрешностей изготовления деталей и увеличивается с уменьшением допустимого значения недокомпенсации.

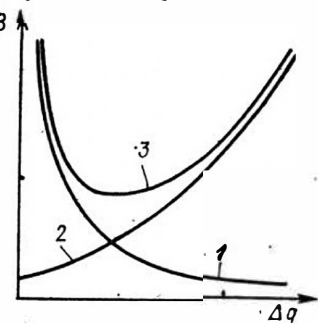


Рис. 2.3. Зависимости стоимости изготовления (1) и сборки (2) деталей от допусков на их изготовление (3 — суммарная стоимость)

## Глава 3

### ОСНОВЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

При использовании компенсационного метода повышения качества ОП возникают вопросы, связанные с организацией процесса компенсации. К ним относятся разработка структурных схем и функциональных зависимостей, связывающих первичные погреш-

ности ОП и параметры компенсатора, выявление закономерностей и правил компенсации систематических и случайных погрешностей, рекомендации по расчету параметров компенсаторов и их практическому выполнению.

### 3.1. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ КОМПЕНСАЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Представим процесс компенсации погрешностей ОП в виде структурной схемы (рис. 3.1), содержащей объект (наблюдения, измерения, управления) 1; оптический прибор 2; компенсатор 3 [ $x$ ,  $y$  — информативные параметры входного и выходного сигналов;  $q_i$  — конструктивные параметры прибора;  $q'_i$  — влияющие факторы (рефракция воздушных слоев, температура, вибрации и т. д.);  $f$  — функция, связывающая  $x$  и  $y$ ;  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $q_{i0}$ ,  $q'_{i0}$ ,  $f_0$  — расчетные (номинальные) значения перечисленных параметров;  $\Delta z_k$  — корректирующий сигнал на компенсатор;  $\Delta x_k$  — коррекция, вырабатываемая компенсатором, поступающая на вход прибора;  $\Delta y_k$  — коррекция компенсатора, подаваемая на выход прибора (т. е. коррекция информативного параметра выходного сигнала);  $\Delta q_{ik}$  — коррекция компенсатора, изменяющая параметры при-

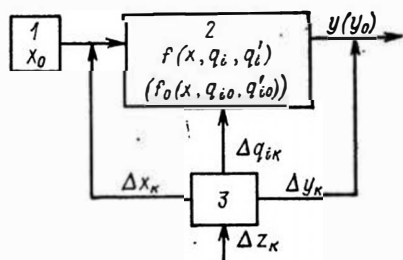


Рис. 3.1. Структурная схема процесса компенсации погрешностей

Методические погрешности, инструментальные, погрешности регистрации и погрешности, возникающие из-за изменения влияющих факторов, приводят к ухудшению качества прибора ( $\Delta y = y - y_0$ ). В зависимости от погрешностей прибора, входного или выходного информативного параметра, влияющих факторов компенсатор вырабатывает коррекционное воздействие, которое так изменяет параметры прибора либо его входной или выходной сигнал, что устраняется (компенсируется) либо результат действия погрешности на тот или иной показатель качества, либо сама погрешность. Для выработки коррекционного воздействия необходимо получить коррекционный сигнал на компенсатор ( $\Delta z_k$ ).

В зависимости от способов получения коррекционного сигнала структурные схемы компенсации погрешностей ОП могут быть построены по методам, аналогичным методам компенсации погрешностей электроизмерительных приборов: вспомогательных измерений, образцовых сигналов, обратного преобразования [2, 12]. Наибольшее распространение в оптических приборах получили первые два метода коррекции.

*Компенсация методом вспомогательных измерений* (рис. 3.2) заключается в том, что погрешности параметров и изменения влияющих факторов (либо их частичные влияния) измеряются с помощью вспомогательных измерительных устройств. Их роль выполняют

обычно контрольно-юстировочные приборы: измерительные микроскопы, автоколлиматоры, приборы измерения линейных величин (индикаторы, оптиметры, интерферометры), датчики температуры и давления, лекальные линейки, пробные стекла и т. д.

Измеренные значения поступают в вычислительное устройство, функции которого при автоматизированной коррекции выполняет процессор, а при неавтоматизированной коррекции — таблицы или графики. В вычислительном устройстве заложена зависимость частичных показателей качества ( $\Delta y_{\Delta q, \Delta q'}$ ) от первичных погрешностей и факторов —  $\Delta y_{\Delta q, \Delta q'} =$

$= f(x, y, q_i, \Delta q_i, \Delta q'_i)$ , а также допустимые значения первичных погрешностей и факторов ( $\Delta q_{i \text{ доп}}$ ,  $\Delta q'_{i \text{ доп}}$ ) и их влияний ( $\Delta y_{\Delta q_i \text{ доп}}$ ,  $\Delta y_{\Delta q'_i \text{ доп}}$ ). На основании сравнения измеренных погрешностей и факторов с их допустимыми значениями (либо действительного и допустимого влияний погрешностей) вычислительное устройство при  $\Delta q_i > \Delta q_{i \text{ доп}}$ ,  $\Delta y_{\Delta q} > \Delta y_{\Delta q_i \text{ доп}}$  вырабатывает коррекционный сигнал на компенсатор  $\Delta z_k$ . Коррекционный сигнал изменяет параметры компенсатора, в результате чего компенсатор воздействует на параметры прибора ( $\Delta q_k$ ) либо на информативные параметры  $x$ ,  $y$  ( $\Delta x_k$ ,  $\Delta y_k$ ) с целью устранения самой погрешности или ее влияния на качество.

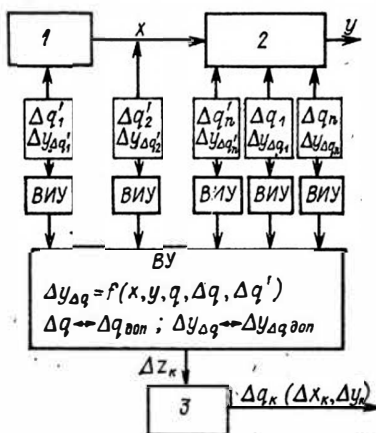


Рис. 3.2. Схема процесса компенсации методом вспомогательных измерений:

1 — объект; 2 — оптический прибор (функциональное устройство); 3 — компенсатор; ВИУ — вспомогательное измерительное устройство; ВУ — вычислительное устройство

В некоторых случаях задачи вспомогательного измерительного и вычислительного устройств решают непосредственно компенсаторы, например, температурные компенсаторы расфокусировки и изменения диаметров линз и зеркал, представляющие собой набор деталей из материалов со специально подобранными коэффициентами линейного расширения.

Методом вспомогательных измерений осуществляют компенсацию погрешностей в процессе регулировки и юстировки приборов регулировочно-юстировочными компенсаторами. Типичными примерами является регулировка фокусных расстояний объективов, их фокусировка, устранение наклона изображения, доводка направляющих поступательного и вращательного движения подвижных систем.

Методом вспомогательных измерений производят также компенсацию влияния перепада температуры, когда по измеренному ее значению вводят поправки в результат (например, изменением цены деления) или изменяют некоторые конструктивные параметры прибора. Таким образом построена компенсация погрешностей в адап-

тивной оптике, где по измеренной деформации волнового фронта, обусловленной турбулентностью воздушных слоев, с помощью процессора управляется адаптивный компенсатор (гибкое зеркало).

Метод вспомогательных измерений обладает следующими особенностями:

1) корректируется не суммарный показатель качества (суммарная погрешность) прибора, а только его составляющие, обусловленные отличием некоторых параметров  $q_i$  и  $q'_i$  от их номинальных значений;

2) для измерения отклонения каждого параметра от его номинального значения ( $\Delta q_i$ ,  $\Delta q'_i$ ) необходимо иметь отдельное ВИУ;

3) вычислительное устройство должно содержать либо допустимые значения первичных погрешностей и факторов, либо допустимые значения их влияний;

4) результат коррекции в существенной мере зависит от качества ВИУ.

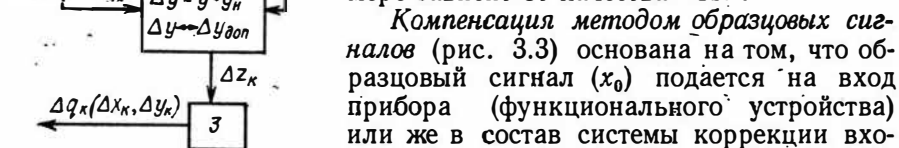


Рис. 3.3. Схема процесса компенсации методом образцовых сигналов:

1 — объект образцовых сигналов; 2 — оптический прибор (функциональный узел); 3 — компенсатор; ОПП — образцовый прямой преобразователь; ВУ — вычислительное устройство

Компенсация методом образцовых сигналов (рис. 3.3) основана на том, что образцовый сигнал ( $x_0$ ) подается на вход прибора (функционального устройства) или же в состав системы коррекции входит образцовый прямой преобразователь (ОПП). Образцовый сигнал позволяет получить номинальное значение ( $y_n$ ) информативного параметра выходного сигнала путем расчета по номинальной функции прибора, а образцовый прямой преобразователь — номинальным преобразованием сигнала.

Номинальное значение ( $y_n$ ) поступает в вычислительное устройство, где вычисляется разность значения  $y_n$  и действительного его значения ( $y$ ), поступившего с выхода прибора ( $\Delta y = y - y_n$ ). Вычислительное устройство на основании сравнения  $\Delta y$  с его допустимым значением ( $\Delta y_{\text{доп}}$ ) вырабатывает при  $\Delta y > \Delta y_{\text{доп}}$  коррекционный сигнал на компенсатор. В качестве образцового сигнала используют волновой фронт эталонного источника светового излучения, эталоны угловых и линейных величин (шкалы, призмы, коллиматоры и т. п.), углы и расстояния между предметами, звездами, длины волн спектральных линий. Образцовыми преобразователями могут быть эталонные приборы, объективы, оптические микрометры.

Методом образцовых сигналов обычно производится компенсация погрешностей при окончательной юстировке прибора или его функциональных узлов. Например, компенсация комы объектива из-за децентрировки линз, когда по дифракционному изображению точки или изображению миры судят о наличии недопустимой комы и устраняют ее смещением (или разворотом вокруг оси) определенной линзы. По такой схеме работают некоторые автоматические компенсаторы



гнутий и расфокусировок телескопов, основанные на встроенных в них эталонных преобразователях.

Метод образцовых сигналов обладает следующими особенностями:

1) корректируется суммарный показатель качества (суммарная погрешность) прибора (или узла), обусловленный действием всех упомянутых выше погрешностей;

2) необходимо наличие образцового информативного параметра входного сигнала  $x_0$  либо образцового прямого преобразователя ОПП, осуществляющего номинальное преобразование;

3) коррекция производится в дискретных точках диапазона работы прибора, соответствующих значениям образцового сигнала;

4) результат коррекции в существенной мере зависит от качества образцового сигнала либо качества ОПП.

Компенсация методом обратного преобразования основана на сравнении информативного параметра входного сигнала ( $x$ ) с его номинальным значением ( $x_n$ ), полученным с помощью преобразования информативного параметра выходного сигнала ( $y$ ) образцовым обратным преобразователем ООП (рис. 3.4). Входной сигнал  $x$  и его номинальное значение  $x_n$  поступают в вычислительное устройство, где их разность сравнивается с ее допустимым значением. На основании этого сравнения вычислительное устройство вырабатывает сигнал  $\Delta z_k$ . В образцовом обратном преобразователе заложена номинальная функция обратного преобразования  $x_n = f_0^{-1}(y, q_{i0}, q'_{i0})$ .

Метод обратного преобразования наиболее часто используют в ОП совместно с методом образцовых сигналов. Метод обратного преобразования имеет следующие особенности:

1) корректируется суммарный показатель качества (суммарная погрешность) прибора, обусловленный инструментальными погрешностями, погрешностями регистрации и влияющими факторами (погрешности, обусловленные допущениями относительно объекта и канала учитываются только при наличии образцового входного сигнала  $x_0$  от объекта наблюдения);

2) необходимо наличие образцового обратного преобразователя ООП, от точности которого существенно зависит также точность коррекции.

Процесс компенсации погрешностей ОП довольно часто строят по смешанной схеме: при поузловой сборке применяют метод вспомогательных измерений, окончательную юстировку производят методом образцовых сигналов, а компенсацию эксплуатационных погрешностей — одним из этих методов. Во всех случаях коррекционное

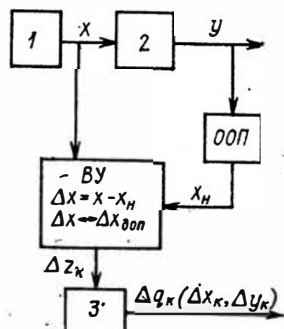


Рис. 3.4. Схема процесса компенсации методом обратного преобразования:  
1 — объект наблюдения;  
2 — оптический прибор; 3 — компенсатор; ООП — образцовый обратный преобразователь

воздействие компенсатора на основании  $\Delta z_k$  может быть направлено как на параметры прибора  $\Delta q_k$ , так и на информативные параметры выходного ( $\Delta y_k$ ) и входного ( $\Delta x_k$ ) сигналов.

### 3.2. КОМПЕНСАЦИЯ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Систематические погрешности оказывают наиболее сильное влияние на показатели качества приборов. Они (особенно систематические погрешности для партии приборов), как следует из выражений (2.16) и (2.30), определяют допуски на технологические первичные погрешности.

Систематические погрешности прибора целесообразно с точки зрения их компенсации разделить на две группы: 1) оказывающие неслучайное влияние на качество всей партии приборов и 2) оказывающие неслучайное влияние на качество отдельного экземпляра. Компенсация влияния погрешности 1-й группы может быть осуществлена компенсатором, параметры которого известны заранее и не требуют индивидуальной регулировки в различных экземплярах приборов, так как погрешность и ее влияние на качество всей партии приборов одинакова. Компенсация влияния погрешности 2-й группы требует регулировки параметров компенсаторов в каждом экземпляре прибора в зависимости от конкретного значения погрешности.

При компенсации погрешностей как 1-й, так и 2-й групп, задачами, решаемыми при проектировании компенсатора являются: определение метода компенсации, расчет параметров компенсатора и разработка методики практической реализации параметров, которая при компенсации систематических погрешностей 2-й группы включает в себя методику измерения конкретного значения погрешностей. Наиболее сложно решать эти задачи в том случае, когда влияние погрешности носит степенной, периодический или комбинированный характер. Рассмотрим некоторые способы решения задач при компенсации этих погрешностей.

*Графо-аналитический способ расчета параметров компенсаторов* основан на графо-аналитическом сравнении влияния компенсируемой погрешности с результатом коррекционного воздействия компенсатора. Рассмотрим компенсацию теоретической погрешности механизма тонкой наводки (типа Мейера) микроскопа, схема которого изображена на рис. 3.5, а. На рис. 3.5, б, в представлены графики точной  $y_T$  и приближенной  $y_n$  зависимостей перемещения тубуса  $y$  от угла поворота  $\alpha$  сектора, теоретической погрешности  $\Delta y_T$ , погрешности от изменения длины плеча рычага  $\Delta y_{\Delta r}$ , недокомпенсации  $\Delta y_{нк}$  для случая полной компенсации теоретической погрешности в конце рабочего диапазона. На рис. 3.5, г, д представлены аналогичные графики  $y_T$ ,  $y_n$ ,  $\Delta y_{нк}$  при равенстве недокомпенсации в конце и середине рабочего диапазона, а на рис. 3.5, е, ж при различном нормировании точности работы в начале и конце рабочего диапазона. Тубус (или стол) микроскопа перемещается на величину  $y = \pm 1$  мм. с помощью зубчато-рычажного механизма, име-

ющего следующие конструктивные параметры:  $r_0 = 6,88$  мм,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $l = 15$  мм. Теоретический закон передачи движения имеет вид  $y_T = r_0 \sin \alpha \pm l(1 - \cos \beta) \approx r_0 \sin \alpha \pm r_0^2 \alpha^4 / (8l)$ . Составляющая  $r_0^2 \alpha^4 / (8l)$ , учитывающая наклон шпильки, оказывает ничтожно малое влияние на закон движения (ввиду того, что  $\beta \ll \alpha$ ), поэтому

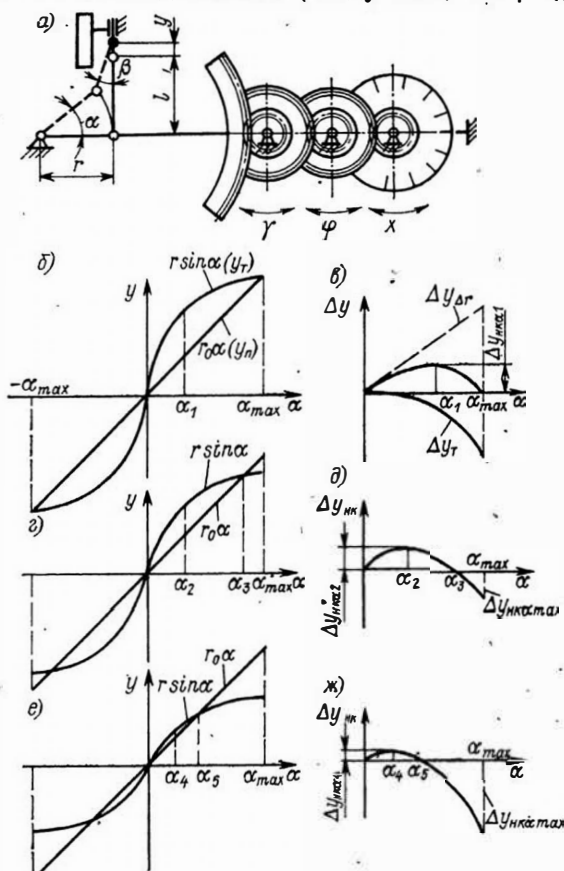


Рис. 3.5. Компенсация теоретической погрешности механизма тонкой фокусировки микроскопа

$y_T \approx r_0 \sin \alpha$ . Так как угол поворота сектора мал, то в основу работы механизма положена приближенная зависимость  $y_n \approx r_0 \alpha$ . Появляющаяся теоретическая погрешность  $\Delta y_T = y_T - y_n \approx -r_0 \alpha^3 / 6$  (см. рис. 3.5, в) достигает в конце диапазона значения 0,0035 мм.

При допустимом значении суммарной погрешности механизма на всем диапазоне  $\Delta y_{\Sigma} = 5$  мкм теоретическая погрешность требует компенсации, так как имеется также большое количество технологических погрешностей, не позволяющих получить требуемую точность работы.

Анализ конструкции механизма показывает, что наиболее просто осуществить компенсацию, если изменить плечо рычага и ввести коррекцию обратного знака. Однако теоретическая погрешность носит степенной характер, а погрешность из-за изменения длины рычага — мультипликативный характер (рис. 3.5, в). Это означает, что возможна только частичная компенсация, причем величина и знак недокомпенсации будут существенно зависеть от значения  $\Delta r_k$ .

Рассмотрим несколько вариантов компенсации. В том случае, когда теоретическая погрешность полностью компенсирована в конце диапазона движения (рис. 3.5, в), максимальное значение недокомпенсации  $\Delta y_{нк \alpha_1}$  и соответствующие ей значения угла  $\alpha_1$  и  $\Delta r_k$  находят следующим образом. Вначале определяют  $\alpha_1$ , приравнявая нулю производную от разности между теоретической (действительной) и приближенной зависимостями:  $(\Delta y_{нк \alpha_1})' = r \cos \alpha_1 - r_0 = 0$ , откуда  $\cos \alpha_1 = r_0/r$ . Так как в конце диапазона движение  $\Delta y_{нк} = r \sin \alpha_{\max} - r_0 \alpha_{\max} = 0$ , то  $r_0/r = \sin \alpha_{\max}/\alpha_{\max}$ . Следовательно,  $\cos \alpha_1 = \sin \alpha_{\max}/\alpha_{\max}$ .

Разложив в степенной ряд правую и левую части этого выражения, получим  $\alpha_1 = \alpha_{\max}/\sqrt{3}$ . Максимальное значение недокомпенсации (в точке  $\alpha_1$ ) будет равно

$$\begin{aligned}\Delta y_{нк \alpha_1} &= r \sin \alpha_1 - r_0 \alpha_1 = r_0 \sin \alpha_1 / \cos \alpha_1 - r_0 \alpha_1 \approx \\ &\approx r_0 \alpha_1^3 / 3 = (r_0 \alpha_{\max}^3 / 6) / 2,6 = \Delta y_r / 2,6,\end{aligned}$$

т. е. теоретическая погрешность уменьшается в 2,6 раза. Коррекцию плеча рычага подсчитываем по формуле  $\Delta r_k = r - r_0 = r_0 (1/\cos \alpha_1 - 1) = r_0 (1 - \cos \alpha_1) / \cos \alpha_1 \approx r_0 \alpha_1^2 / 2 = r_0 \alpha_{\max}^2 / 6$ .

Другой вариант возможной компенсации основан на такой коррекции  $r$ , что значение  $\Delta y_{нк \alpha_2}$  в начале диапазона движения равно по значению  $\Delta y_{нк \alpha_{\max}}$ , но обратно по знаку в конце этого рабочего диапазона (см. рис. 3.5, д). Угол  $\alpha_2$ , соответствующий максимальной недокомпенсации, найдем, если приравняем нулю производную от разности между  $y_r$  и  $y_n$ :  $(\Delta y_{нк \alpha_2})' = r \cos \alpha_2 - r_0 = 0$ , откуда  $r_0 = r \cos \alpha_2$ . Так как значения недокомпенсации в начале и в конце диапазона движения равны, то  $r \sin \alpha_2 - r_0 \alpha_2 = -r \sin \alpha_{\max} + r_0 \alpha_{\max}$ . Преобразовав это выражение, получим  $r_0 (\alpha_2 + \alpha_{\max}) = r (\sin \alpha_2 + \sin \alpha_{\max})$ , и после подстановки  $-\cos \alpha_2 (\alpha_2 + \alpha_{\max}) = \sin \alpha_2 + \sin \alpha_{\max}$ . Разложим функции синуса и косинуса в степенной ряд, при этом ограничимся первыми двумя членами:

$$(1 - \alpha_2^2/2)(\alpha_2 + \alpha_{\max}) = \alpha_2 - \alpha_2^3/6 + \alpha_{\max} - \alpha_{\max}^3/6.$$

После преобразования этого выражения получаем уравнение  $2\alpha_2^3 + 3\alpha_2^2\alpha_{\max} - \alpha_{\max}^3 = (\alpha_2 + \alpha_{\max})(2\alpha_2^2 + \alpha_2\alpha_{\max} - \alpha_{\max}^2) = 0$ , откуда  $\alpha_2 = 0,5\alpha_{\max}$ . Максимальное значение недокомпенсации определим по формуле

$$\begin{aligned}\Delta y_{нк \alpha_2} &= r \sin \alpha_2 - r_0 \alpha_2 = r_0 (\lg \alpha_2 - \alpha_2) \approx \\ &\approx r_0 \alpha_2^3 / 3 = r_0 \alpha_{\max}^3 / 24 = \Delta y_r / 4.\end{aligned}$$

Таким образом, теоретическая погрешность уменьшилась в четыре раза.

Следует однако заметить, что такое уменьшение погрешности справедливо для случая, когда измерения начинаются от  $\alpha = 0$ . В случае произвольного выбора начала измерения мы можем производить их из положения  $\alpha_2$  и заканчивать, например, в положении  $\alpha_{\max}$ , тогда  $\Delta y_{\text{нк max}} = r_0 \alpha_{\max}^3 / 2$ , т. е.  $\Delta y_{\text{т}}$  уменьшится в два раза.

Коррекцию плеча рычага определяют аналогично способу, рассмотренному выше:  $\Delta r_{\text{к}} \approx r_0 \alpha_2^2 / 2 = r_0 \alpha_{\max}^2 / 8$ . Для угла  $\alpha_3$  недокомпенсация  $\Delta y_{\text{нк } \alpha_3} = 0$ , т. е.  $r_0 \alpha_3 = r \sin \alpha_3$ , откуда  $\alpha_3 \cos \alpha_2 = \sin \alpha_3$ . Разложив в степенной ряд левую и правую части равенства, имеем:  $\alpha_3 (1 - \alpha_2^2 / 2) = \alpha_3 - \alpha_3^3 / 6$ . Следовательно,  $3\alpha_2^2 = \alpha_3^2$  и  $\alpha_3 = \sqrt{3}\alpha_2 = 0,87\alpha_{\max}$ .

В тех случаях, когда точность работы этого механизма нормируется по-разному на всем диапазоне движения, целесообразно применить третий вариант коррекции. Тогда изменение  $r$  (если измерения начинаются при  $\alpha = 0$ ) нужно осуществлять так, чтобы значение  $\Delta y_{\text{нк } \alpha_4}$  в начале диапазона движения было меньше, чем в конце его (например, во столько раз, во сколько допустимая погрешность в начале диапазона меньше погрешности в конце диапазона движения:  $\Delta y_{\text{нк } \alpha_4} / \Delta y_{\text{нк } \alpha_{\max}} = \Delta y_{\text{дн}} / \Delta y_{\text{дк}}$ , рис. 3.5, ж). Параметры  $\alpha_4$ ,  $\Delta r_{\text{к}}$ ,  $\Delta y_{\text{нк } \alpha_4}$ ,  $\Delta y_{\text{нк } \alpha_{\max}}$  определяют аналогично.

Заметим, что если в данном механизме осуществляется компенсация только теоретической погрешности, то регулировать длину плеча в каждом экземпляре не нужно, т. е. коррекция может быть осуществлена исправлением размера  $r_0$  в чертеже детали на величину  $\Delta r_{\text{к}}$ .

*Расчет параметров компенсаторов по способу наименьших квадратов* применяют обычно при необходимости аппроксимации экспериментальных данных для определения функциональной зависимости, которая наилучшим образом описывает изменение интересующей нас величины (т. е. позволяет нам выбрать, какая, например, из прямых экспонент или полиномов может описать искомую зависимость). Способ наименьших квадратов может быть применен также для расчета компенсатора. Например, с его помощью можно решить предыдущую задачу по определению оптимальной коррекции рычага тонкой фокусировки микроскопа для уменьшения теоретической погрешности. Наиболее целесообразно этот метод использовать для определения параметров компенсатора по экспериментальным данным о компенсируемом суммарном показателе качества.

Если в предыдущем примере плечо рычага  $r$  сделать регулируемым, то, измерив суммарную погрешность перемещения тубуса (стола) микроскопа, обусловленную всеми систематическими погрешностями, можно по способу наименьших квадратов вычислить необходимое значение  $\Delta r_{\text{к}}$  изменения  $r$  для оптимальной компенсации.

Используем способ наименьших квадратов для определения параметров компенсатора в измерительном устройстве (линзовом компенсаторе) дальномера (см. рис. 1.5).

Суммарная погрешность измерения параллактического угла  $y = r_2 k p x / (f' r_1 2\pi)$ , где  $r_1, r_2$  — длины плеч рычага;  $k, p$  — число заходов и шаг резьбы винта соответственно;  $x$  — угол поворота винта;  $f'$  — фокусное расстояние подвижной линзы афокального объектива, обуславливается следующими погрешностями: фокусного расстоя-

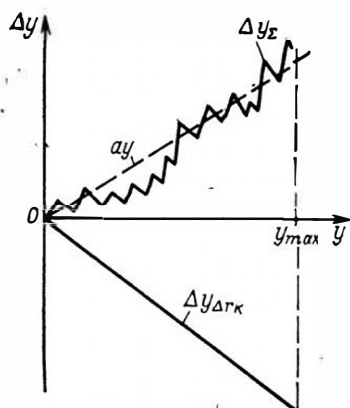


Рис. 3.6. Компенсация суммарной погрешности линзового компенсатора дальномера:  $\Delta y_{\Sigma}$  — суммарная погрешность;  $ay$  — сглаживающая прямая;  $\Delta y_{\Delta r_k}$  — коррекционное воздействие компенсатора

ния подвижной линзы  $\Delta f'$ , длин плеч рычага ( $\Delta r_1, \Delta r_2$ ), шага винта  $\Delta p$ , форм опорных поверхностей рычагов  $\Delta h_1, \Delta h_2$ , осевым зазором в винтовой паре (данная погрешность компенсируется индивидуально с помощью разрезной гайки). Влияние перечисленных погрешностей столь велико, что в этом устройстве предусмотрена компенсация их действия регулировкой плеча  $r_1$ . Оптимальное значение коррекции плеча можно определить по методу наименьших квадратов, измерив суммарную погрешность устройства  $\Delta y_{\Sigma}$  в функции угла  $y$  (рис. 3.6). Измерение производится на установке, схема которой изображена на рис. 3.7 [40].

Проверяемый узел устанавливается между коллиматорной и зрительной трубами, предварительно выставленными друг относительно друга. Вращением вала винта (на который устанавливают

либ для ввода углов  $x$ ) добиваются нулевого отсчета по окулярному микрометру 3 (т. е. в этом положении  $y = 0$ ). Затем изменением  $x$  устанавливают расчетные значения угла  $y$  на измерительном устройстве и с помощью окулярного микрометра зрительной трубы измеряют его действительные значения:  $y_d = l/f_{об}$ , где  $l$  — перемещение изображения;  $f_{об}$  — фокусное расстояние объектива зрительной трубы. По результатам измерений рассчитывают значение  $\Delta r_k$ . Так как  $\Delta y_k = -\Delta y_{\Delta r} = -y \Delta r_k / r = -ay$ , где  $a = \Delta r_k / r$ , то задача заключается в том, чтобы подобрать такое  $a$ , при котором сумма квадратов отклонений экспериментальной зависимости от сглаживающей прямой была бы минимальной:

$$F = \sum_i^n (\Delta y_i - ay_i)^2 = \min, \quad \text{т. е.} \quad \frac{\partial F}{\partial a} = 2 \sum_i^n (\Delta y_i - ay_i) y_i = 0.$$

Отсюда  $a = \left( \sum_i^n y_i \Delta y_i \right) / \left( \sum_i^n y_i^2 \right)$ , следовательно,

$$\Delta r_k = -r \left( \sum_i^n \Delta y_i y_i \right) / \left( \sum_i^n y_i^2 \right)$$

Величину недокомпенсации определяем из выражения  $\Delta y_{\text{нк}i} = \Delta y_i - (\Delta r_{\text{к}}/r) y_i$ .

В некоторых приборах и устройствах имеется аддитивная составляющая суммарной погрешности, в результате чего погрешность сглаживается прямой, имеющей уравнение вида  $\Delta y = ay + b$ . В этом случае коэффициенты  $a$  и  $b$  находят из следующих уравнений [10]:

$$a = \frac{n \sum_i y_i \Delta y_i - \sum_i y_i \sum_i \Delta y_i}{n \sum_i y_i^2 - \left( \sum_i y_i \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_i y_i^2 \sum_i \Delta y_i - \sum_i y_i \sum_i y_i \Delta y_i}{n \sum_i y_i^2 - \left( \sum_i y_i \right)^2}.$$

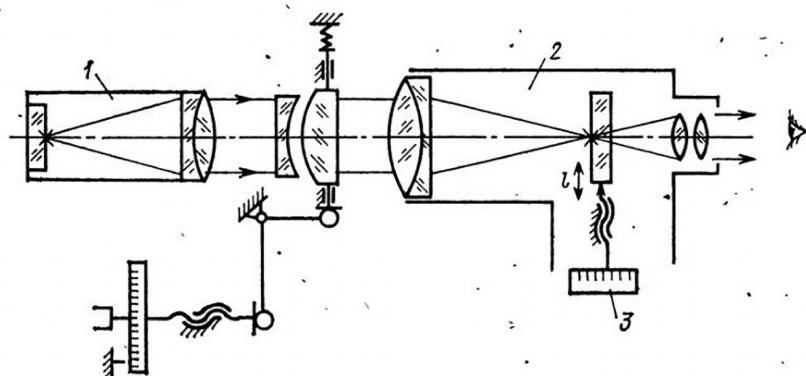


Рис. 3.7. Установка для измерения погрешности углов отклонения линзового компенсатора:

1 — коллиматор; 2 — зрительная труба с окулярным винтовым микрометром 3

Если суммарная погрешность носит степенной или периодический характер, соответствующие коэффициенты сглаживающей кривой определяют путем решения системы  $m$  уравнений с  $m$  неизвестными:

$$\left. \begin{aligned} \sum_i^n [\Delta y_i - f(y_i, a, b, c, \dots, m)] \left( \frac{\partial f}{\partial a} \right)_i &= 0; \\ \sum_i^n [\Delta y_i - f(y_i, a, b, c, \dots, m)] \left( \frac{\partial f}{\partial b} \right)_i &= 0; \\ \sum_i^n [\Delta y_i - f(y_i, a, b, c, \dots, m)] \left( \frac{\partial f}{\partial m} \right)_i &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Решить эту систему можно в том случае, если задать вид сглаживающей функции на основании характера рассчитанной или измеренной погрешности. Коррекционное устройство таких погреш-

ностей основано на кулачках или нелинейных механизмах, воспроизводящих сглаживающую кривую (например, коррекцию приводов ОП, содержащих винтовые и зубчатые механизмы, с помощью кулачка). Выполнение или регулировка параметров компенсатора производится в каждом экземпляре прибора индивидуально.

### 3.3. КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ И ФАКТОРОВ

Некоторые погрешности и факторы оказывают случайное влияние на качество как партии, так и отдельного экземпляра прибора. К ним относятся турбулентность воздушных слоев, нестабильность трения и нерегулярные биения в кинематических парах, внутренние и внешняя вибрации, случайные составляющие погрешности наведения и снятия отсчетов, нестабильность источников питания, шумы приемников и электронных устройств, нерегулярные изменения внешней среды. Компенсировать сами погрешности не представляется возможным, поэтому стремятся лишь уменьшить влияние их на качество ОП. Компенсация влияния случайных погрешностей и факторов основана на одном из свойств случайных величин, использовании адаптивных компенсаторов, работающих в реальном масштабе времени, применении организационно-технических мероприятий.

**Использование свойств случайных величин.** Для компенсации влияния случайных погрешностей на точность функционирования ОП используют известное свойство уменьшения влияния случайной погрешности при увеличении числа повторных циклов функционирования (измерений, наводок). Сущность этого метода состоит в том, что среднее значение выходного информативного параметра

$\bar{y} = \sum_{i=1}^n y_i/n$  имеет среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{\bar{y}} =$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{n}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\sigma_n}{n}\right)^2} = \sigma/\sqrt{n}$$

меньшее примерно на значение корня квадратного из повторных циклов ( $n$ ), чем  $\sigma$  отдельного измерения или наводки. В связи с этим для уменьшения влияния случайных погрешностей на практике широко используют увеличение числа измерений одной и той же величины. Примерами компенсации такого рода являются повторные измерения угла между объектами с помощью теодолита, многократные повторные наводки окулярного микрометра микроскопа на края измеряемого объекта, повторные измерения превышения высот при нивелировании.

В некоторых ОП, содержащих фотоэлектрические датчики линейных и угловых перемещений, результат повторных измерений регистрируется и обрабатывается с помощью используемых в них ЭВМ, что позволяет существенно повысить экономическую эффективность данного метода компенсации. На этом свойстве основаны также некоторые коррекционные устройства ОП, например, интегрирующее устройство авиационного секстанта, схема которого приведена на рис. 3.8. В авиационном секстанте высота светила изме-



ряется путём поворота зеркала 3 при совмещении изображения светила с изображением пузырька уровня. Вследствие качки корабля, дрожания рук оператора и неточностей совмещения погрешность измерения угла составляет 1—2°. Применение интегрирующего устройства (см. п. 4.7), позволяющего определить среднее значение высоты светила  $h$  за некоторое время, в течение которого оператор удерживает пузырек уровня и изображение светила, эта погрешность уменьшается до значения 2—3' [25]:

$$h = \frac{\kappa}{T} \int_0^T \alpha dt,$$

где  $k$  — масштабный коэффициент;  $\alpha$  — угол поворота угломерного барабана (угол поворота зеркала  $\mathcal{B}$ );  $t$  — время, в течение которого

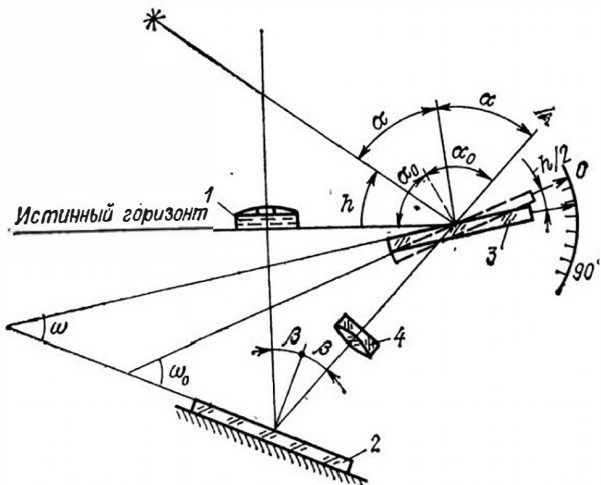


Рис. 3.8. Схема секстанта:

1 — фокусный уровень; 2 — неподвижное зеркало; 3 — подвижное зеркало; 4 — объектив

производилось усреднение (границы интегрирования  $T$  составляют 40, 120 или 200 с).

Следует отметить, что при увеличении числа измерений можно уменьшить только влияние случайной погрешности, систематические же погрешности остаются при этом неизменными.

**Применение адаптивных компенсаторов.** Параметры адаптивных компенсаторов изменяются в реальном масштабе времени в процессе функционирования прибора. Это значит, что они позволяют компенсировать влияние погрешности (или фактора) со скоростью, соизмеримой со скоростью изменения погрешности. Запаздывание регулирования параметров компенсатора не должно нарушать требуемой точности компенсации. Для этого за время адаптации (коррекции)  $\Delta t_k = t_2 - t_1$ , в течение которой происходит измерение корректируемого влияния  $\Delta y_{t_1}$  либо самой погрешности или фактора, вы-

работка коррекционного воздействия на компенсатор  $\Delta z_k$  и изменение параметров компенсатора, создающих  $\Delta y_k$  (рис. 3.9), изменение влияния погрешности (фактора) не должно быть больше максимально допустимого значения недокомпенсации, т. е.  $\Delta y_t, -\Delta y_k \leq \Delta y_{\text{нк max}}$ .

Время адаптации компенсатора, работающего в автоматическом режиме по одной из схем коррекции (вспомогательных измерений, образцовых сигналов, обратного преобразования или смешанной), в зависимости от вида корректируемых погрешностей и факторов изменяется от нескольких часов до долей секунды. Наиболее сложно компенсировать влияние случайных погрешностей и факторов, изменяющихся с большой скоростью (например, влияние рефракций

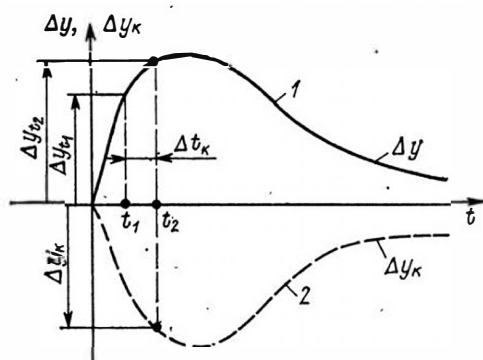


Рис. 3.9. Изменение влияния случайной погрешности 1 и коррекции 2 во времени

воздушных слоев). Известно [1], что коррекция атмосферной турбулентности требует быстрого действия адаптивных компенсаторов телескопов и оптических систем связи, равного примерно 0,01 с. Создание таких систем привело к появлению нового перспективного направления в физике и технике — адаптивной оптики.

Под адаптивной оптикой понимают оптическую систему, позволяющую благодаря активному элементу (роль ко-

торого выполняет чаще всего гибкое зеркало) компенсировать влияние турбулентности земной атмосферы путем изменения формы волнового фронта. Адаптивные компенсаторы оптических систем могут быть использованы для компенсации погрешностей, обусловленных вибрациями, перепадами температуры, нестабильностью трения и биениями в кинематических парах механизмов наведения.

Рассмотрим схему и принцип работы экспериментального телескопа с адаптивным компенсатором атмосферных искажений [1, 49]. Пучок лучей от звезды или наземного излучения попадает на главное зеркало телескопа 1 (рис. 3.10), которое с помощью диагональных зеркал 2 и 3 строит изображение перед проекционной линзой 4. Линза через светоделительное зеркало 5 передает изображение на щели, установленные во втором фокусе перед фотоумножителями ФЭУ1 и ФЭУ2. Диагональное зеркало 2 установлено на пьезоэлектрических колонках, позволяющих при подаче на них напряжения наклонять зеркало для центрировки изображения относительно щели анализатора. Управление зеркалом осуществляется фотоэлектронными умножителями ФЭУ3 и ФЭУ4, измеряющими поток от двух половин щели. Диагональное зеркало 3, являющееся основным устройством адаптивной системы, состоит из шести подвижных элементов (зеркал), перемещающихся перпендикулярно к плоскости зеркала для коррекции атмосферных искажений волнового фронта.

Перемещение осуществляется пьезоэлектрическими цилиндрами на величину долей длины волны света всего за 0,06 мс. Максимальное перемещение (при подаче напряжения  $\pm 1000$  В) составляет  $\pm 2,5$  мкм. Управление перемещением осуществляется ФЭУ2, анализирующим резкость изображения, и блоком программной логики, последовательно перемещающей элементы зеркала. Управляющее логическое устройство обеспечивает поиск таких положений элементов зеркал, которым соответствует максимальный сигнал с ФЭУ2. Фотоэлектрический умножитель ФЭУ1 вместе со щелью перемещается поперек изображения и используется для его записи. На рис. 3.11, а, б

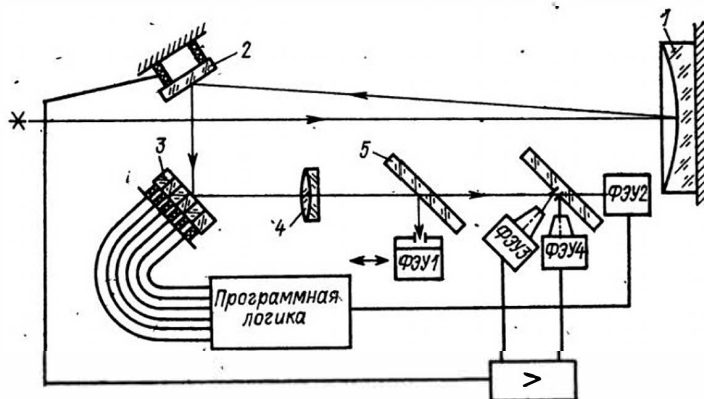


Рис. 3.10. Схема телескопа с адаптивным компенсатором атмосферных искажений

[49, 50] приведены результаты испытаний этого телескопа в случае искусственной звезды (изображение лазерного источника света, сформированное через 250-метровый слой турбулентной атмосферы, рис. 3.11, а) и естественной (изображение Сириуса, рис. 3.11, б).

Как видно из рисунков, применение адаптивного компенсатора позволяет существенно улучшить резкость изображения звезд, практически приближая его к дифракционному пределу качества изображения. К недостаткам адаптивных телескопов [1] относятся ограничения, связанные с немонохроматичностью излучения звезд (что мешает устранить влияние рефракций воздушных слоев для широкого диапазона длин волн, так как деформации на различных длинах волн могут оказаться в данный момент времени различными); получение идеального изображения на оси телескопа, но не по всему полю зрения; невозможность использования в некоторых случаях адаптивного телескопа из-за предельного быстродействия адаптивной системы.

**Применение организационно-технических мероприятий.** Организационно-технические мероприятия, позволяющие уменьшить влияние случайных погрешностей и факторов на качество прибора, заключаются в создании таких условий работы прибора, которые

предотвращают появление или уменьшают погрешности. К ним можно отнести создание термостатированных помещений, уменьшение циркуляций воздушных слоев, создание постоянного давления, влажности, виброзащиты и т. д.

Одним из эффективных методов является также улучшение качества изображения, создаваемого оптической системой, с помощью

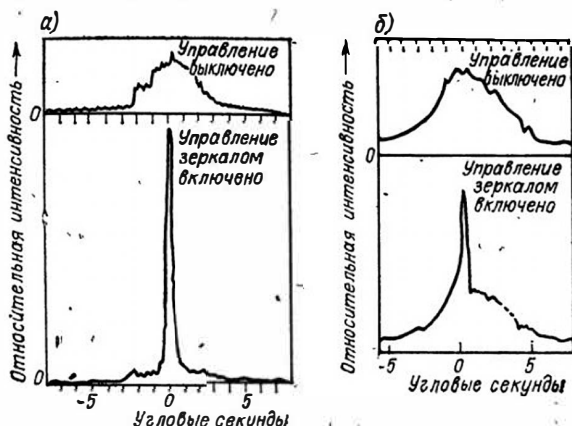


Рис. 3.11. Изображения источников излучения, полученные с помощью телескопа

апостериорного восстановления деталей объекта по его искаженному изображению. Для этого необходимо иметь данные об изменении оптической передаточной функции и уровне отношения сигнал/шум для полученного изображения.

## Глава 4

### ТИПОВЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

В процессе функционирования ОП происходит преобразование входного сигнала его функциональными устройствами. В зависимости от вида преобразований функциональные устройства принято подразделять на оптические, оптико-электронные, механические и др. В конструктивном отношении они представляют собой отдельные узлы или совокупность узлов, объединенных общим назначением.

К оптическим функциональным устройствам относятся объективы, зеркально-призменные системы, окулярные и оптические микрометры, преобразователи линейных и угловых перемещений на основе шкал, лимбов, дифракционных решеток, оптические сканирующие устройства и др.

От качества этих функциональных устройств зависят показатели качества всего ОП. Рассмотрим устройство, расчет и юстировку типовых компенсаторов погрешностей наиболее употребительных функциональных устройств.

#### 4.1. ТЕРМОКОМПЕНСАТОРЫ

При изменении температуры качество ОП может существенно ухудшиться из-за возможной расфокусировки оптической системы, децентрировок или пережатий оптических деталей, изменения фокусных расстояний, размеров и положения элементов конструкции. Наиболее значительное влияние оказывает изменение температуры на точность функционирования ОП, качество изображения, создаваемого оптической системой, и надежность.

**Компенсаторы расфокусировки.** Рассмотрим объектив, строящий изображение на фотоприемнике, установленном в его фокальной плоскости (рис. 4.1). Объектив состоит из двух склеенных компонентов.

Изменение температуры приводит к изменению радиусов кривизны, показателей преломления и толщины линз объектива. Из-за удлинения корпуса изменяется и расстояние между объективом и приемником.

Для отдельной тонкой линзы (пренебрегая изменением ее толщины) изменение ее фокусного расстояния определим из выражения

$$\begin{aligned} \Delta f'_{\Delta t} &= -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta t} = -f'^2 \left[ \frac{\Delta n_{\Delta t}}{n-1} \Phi - (n-1) \left( \frac{\Delta r_{1\Delta t}}{r_1^2} - \frac{\Delta r_{2\Delta t}}{r_2^2} \right) \right] = \\ &= -f'^2 \left[ \frac{\beta_\lambda \Delta t}{n-1} \Phi - (n-1) \alpha \Delta t \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \right] = \\ &= -f'^2 \left[ \left( \frac{\beta_\lambda}{n-1} - \alpha \right) \Phi \Delta t \right] = -f'^2 V_t \Phi \Delta t = -f' V_t \Delta t, \quad (4.1) \end{aligned}$$

где  $\Delta n_{\Delta t} = \beta_\lambda \Delta t$  — изменение показателя преломления при изменении температуры на величину  $\Delta t$  ( $\beta_\lambda$  — температурное приращение показателя преломления для длины волны света  $\lambda$ );  $\Delta r_{1,2\Delta t} = r_{1,2} \alpha \Delta t$  — изменение радиуса кривизны поверхности при изменении температуры ( $\alpha$  — коэффициент линейного расширения материала линзы);  $V_t = [\beta_\lambda/(n-1) - \alpha]$  — термооптическая постоянная. Для склейки из двух линз будем иметь

$$\Delta f'_{\Delta t} = -f'^2 (\Phi_1 V_{1t} + \Phi_2 V_{2t}) \Delta t. \quad (4.2)$$

Изменение фокусного (и вершинного фокусного) расстояния приводит к расфокусировке системы, изменению масштаба. Термоопти-

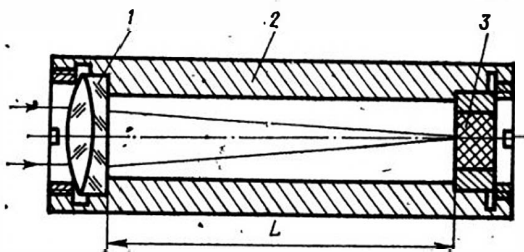


Рис. 4.1. Конструкция узла объектива без компенсатора:

1 — объектив; 2 — корпус; 3 — фотоприемник

ческие aberrации мы не учитываем, так как их значение, как правило, невелико и может быть сведено к нулю специальным подбором марок стекол [21]. В том случае, если марки стекол подобраны так, чтобы фокусное расстояние оставалось неизменным при колебании температуры, т. е.  $\Delta f'_s \Delta t = 0$ , что возможно при выполнении условия  $\Phi_1 V_{1t} = -\Phi_2 V_{2t}$  (т. е. при  $V_{2t} = v_2 V_{1t}/v_1$ , так как для склейки обычно соблюдается соотношение  $\Phi_1/v_1 = -\Phi_2/v_2$ ), расфокусировка будет иметь место из-за изменения длины корпуса.

Компенсация расфокусировки оптической системы при колебаниях температуры является одной из часто встречающихся задач. Она осуществляется, как правило, подвижкой объектива, его компонента или приемника вдоль оптической оси. Движение производится

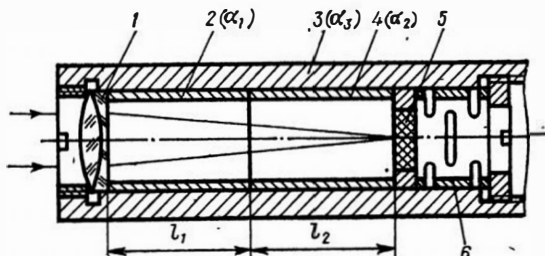


Рис. 4.2. Компенсатор расфокусировки объектива:  
1 — объектив; 2, 4 — кольца с различными коэффициентами линейного расширения; 3 — корпус; 5 — фотоприемник; 6 — пружинное кольцо

с помощью набора специальных деталей, имеющих определенное значение коэффициентов линейного расширения, жидкостных резервуаров и электродвигателей.

На рис. 4.2 изображен компенсатор расфокусировки, состоящий из двух цилиндрических колец, установленных между объективом и фотоприемником.

Условие отсутствия расфокусировки имеет вид:

$$\Delta f'_s \Delta t = \Delta l_1 \Delta t + \Delta l_2 \Delta t; \quad -f_s'^2 (\Phi_1 V_{1t} + \Phi_2 V_{2t}) = l_1 \alpha_1 + l_2 \alpha_2. \quad (4.3)$$

Так как  $l_1 + l_2 \approx f'_s$ , то, выбрав материал, из которого будут изготовлены кольца термокомпенсатора (т. е. при известных коэффициентах  $\alpha_1, \alpha_2$ , один из которых, как правило, больше, а другой меньше термооптических постоянных стекол), можно решить уравнение (4.3) относительно неизвестных  $l_1$  и  $l_2$ :

$$l_1 = [-f_s'^2 (\Phi_1 V_{1t} + \Phi_2 V_{2t}) - f_s'^2 \alpha_2] / (\alpha_1 - \alpha_2).$$

Первоначальная фокусировка объектива (при номинальной температуре) в подобной конструкции осуществляется во время юстировки системы подрезкой одного из колец термокомпенсатора либо подрезкой оправы приемника или оправы объектива. Пружинное кольцо должно производить надежное замыкание системы объектив—кольца—приемник при всех возможных колебаниях температуры.

В том случае, когда термооптические постоянные стекол имеют значения, приводящие к уменьшению фокусного расстояния системы при увеличении температуры, термокомпенсатор должен уменьшать расстояния между объективом и приемником.

На рис. 4.3 изображен термокомпенсатор, позволяющий производить перемещения приемника как влево, так и вправо вдоль оптической оси при увеличении температуры путем подбора материалов цилиндрических колец термокомпенсатора. Условие отсутствия расфокусировки будет иметь вид

$$\Delta f'_{\Delta t} = (L_K \alpha_K - l_1 \alpha_1 + \\ + l_2 \alpha_2 - l_3 \alpha_3) \Delta t,$$

где  $\alpha_K, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  — коэффициенты линейного расширения корпуса и колец. Первоначальная фокусировка может производиться с помощью резьбового кольца 4.

Наиболее значительно влияет перепад температур на расфокусировку длиннофокусных линзовых и зеркальных объективов. Для того чтобы иметь представление о реальных значениях расфокусировки таких систем, рассмотрим термокомпенсатор зеркала телескопа, рассчитанный и изготовленный объединением ЛОМО имени В. И. Ленина.

На рис. 4.4 изображен компенсатор расфокусировки зеркала телескопа, изготовленного из стекла пирекс (коэффициент линейного расширения  $\alpha_p = 3 \cdot 10^{-6}$  1/град) с радиусом отражающей поверхности  $r = 4200$  мм. Изображение строится в фокальной плоскости зеркала. С фокальной плоскостью сопряжена последующая оптическая система либо плоскость фотоприемника. Фокусное расстояние зеркала  $f = r/2 = 2100$  мм. Согласно техническим условиям колебание температуры допускается на величину  $\Delta t = \pm 30^\circ$ . Возможная расфокусировка (без учета тубуса), возникающая из-за изменения фокусного расстояния зеркала равна  $\Delta z = \Delta f'_{\Delta t} = \Delta r_{\Delta t}/2 = = r \alpha_p \Delta t/2 = f' \alpha_p \Delta t = \pm 0,2$  мм.

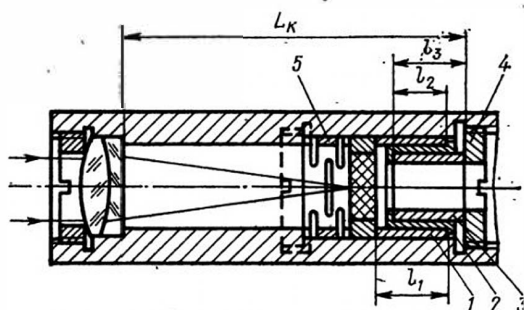


Рис. 4.3. Узел с компенсатором расфокусировки объектива:

1—3 — набор колец с различными коэффициентами линейного расширения; 4 — резьбовое кольцо; 5 — пружинное кольцо

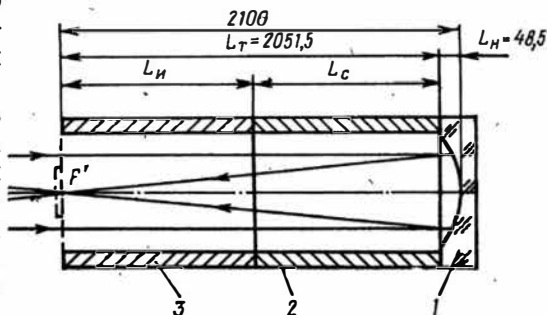


Рис. 4.4. Компенсатор расфокусировки зеркала телескопа:

1 — зеркало; 2 — кольцо из стали; 3 — кольцо из инвара

Для компенсации расфокусировки тубус выполнен в виде набора цилиндров из стали ( $\alpha_c = 11,8 \cdot 10^{-6}$  1/град) и инвара ( $\alpha_n = 1,6 \times 10^{-6}$  1/град). Определим длину стальных ( $L_c$ ) и инваровых ( $L_n$ ) цилиндров.

Условия отсутствия расфокусировки имеют вид:

$$\Delta f'_{\Delta t} = \Delta L_c \Delta t + \Delta L_n \Delta t + \Delta L_n \Delta t;$$

$$f' \alpha_p \Delta t = L_c \alpha_c \Delta t + L_n \alpha_n \Delta t + L_n \alpha_p \Delta t.$$

Так как  $L_n = L_t - L_c$ , то  $L_c = (f' \alpha_p - L_t \alpha_n - L_n \alpha_p) / (\alpha_c - \alpha_n) = 350$  мм, откуда  $L_n = 1701,5$  мм.

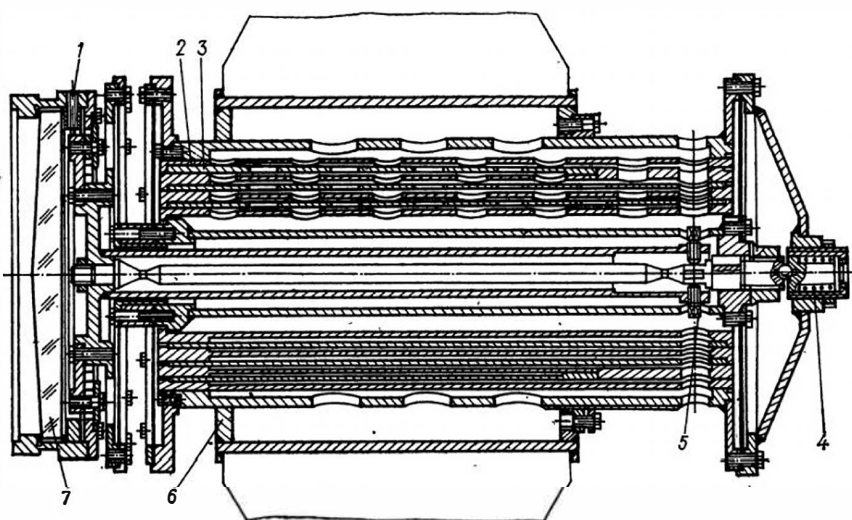


Рис. 4.5. Компенсатор расфокусировки:

1 — юстировочный винт; 2, 3 — цилиндрические стаканы с чередующимися коэффициентами линейного расширения; 4 — замыкающая пружина; 6 — юстировочный винт; 6 — корпус средника; 7 — зеркало

Для сокращения габаритных размеров такой термокомпенсатор выполняют в виде набора цилиндров, вставленных друг в друга и имеющих различные коэффициенты линейного расширения (рис. 4.5). Цилиндры должны быть изготовлены и собраны так, чтобы не было заклиниваний и заеданий. На их сопрягаемые поверхности наносят тонкий слой смазки. Первоначальная фокусировка зеркала 7 осуществляется подвижкой всего компенсатора относительно корпусной детали 6. В данной конструкции предусмотрена также центровка зеркала.

В случае выполнения конструкции термокомпенсатора в виде набора цилиндров (см. также рис. 4.11) суммарное осевое перемещение внутреннего цилиндра, связанного с зеркалом, относительно наружного, связанного с корпусом, равно

$$\Delta l_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n l_{1i} \alpha_{1i} \Delta t - \sum_{i=1}^m l_{2i} \alpha_{2i} \Delta t,$$



где  $l_1, \alpha_1$  и  $l_2, \alpha_2$  — размеры и коэффициенты линейного расширения охватывающего (в осевом направлении) и охватываемого цилиндров соответственно;  $n, m$  — количество соответствующих цилиндров (обычно  $m = n$ , либо  $m = n \pm 1$ ). Охватывающие цилиндры выполняют из одного материала (например, стали с  $\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6}$  1/град; титана с  $\alpha \approx 8,5 \cdot 10^{-6}$  1/град; инвара с  $\alpha \approx 1,6 \cdot 10^{-6}$  1/град), а охватываемые — из другого (например, алюминия, дуралюминия с  $\alpha \approx (22 \div 24) 10^{-6}$  1/град; латуни и нейзильбера с  $\alpha \approx 18 \cdot 10^{-6}$  1/град; пластмасс с  $\alpha \approx (20 \div 100) 10^{-6}$  1/град), поэтому  $\Delta l_{\Sigma} = (\alpha_1 l_{1\Sigma} - \alpha_2 l_{2\Sigma}) \Delta t$ , где  $l_{1\Sigma}, l_{2\Sigma}$  — суммарная длина соответствующих цилиндров. Для случая  $m = n$  и  $l_{1i} = l_{2i} = l$  получим  $\Delta l_{\Sigma} = \kappa l (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t$ .

Часто наружное кольцо выполняют из того же материала, из которого изготовлен корпус (оправа) оптического элемента. Так как коэффициент линейного расширения стекла обычно меньше коэффициента материала, из которого изготовлен корпус, то для внутренних колец подбирают материал, имеющий коэффициент линейного расширения, больший коэффициента материала оправы  $\alpha_c < \alpha_o < \alpha_k$ .

При колебаниях температуры происходит также изменение диаметров сопрягаемых цилиндров. Во избежание заклинивания посадка в их сопряжении рассчитывается так, чтобы обеспечить при максимально возможном отклонении температуры от номинальной гарантированный зазор  $\Delta C_{\min} = \Delta C_{o \cdot \min} + (\alpha_1 - \alpha_2) D \Delta t_{\max}$ , где  $\Delta C_{o \cdot \min}$  — вероятный минимальный зазор при номинальной температуре;  $D$  — диаметр сопрягаемых элементов;  $\Delta t_{\max}$  — максимальное отклонение температуры от номинальной.

Когда для компенсации, возникающей при перепаде температур расфокусировки, требуется создать значительные (до 10 мм) перемещения элементов оптической системы, термокомпенсаторы в виде набора цилиндров не применяют из-за большой массы и габаритных размеров. Компенсация расфокусировки в этом случае может быть осуществлена подвижкой элементов, например, с помощью жидкостного резервуара, установленного на корпусе системы<sup>1</sup>. На рис. 4.6 изображена схема оправы объектива с жидкостным термокомпенсатором, основанном на перемещении в корпусе 1 объектива оправы линзы 4 с помощью рычажного механизма 6 поршнем 7. Перемещение поршня вызвано изменением объема жидкости резервуара 8 при изменении температуры. Перемещение поршня с учетом изменения объема корпуса резервуара и площади самого поршня при изменении температуры на  $\Delta t$  равно

$$L_1 = \Delta V_{\Delta t} / A = [V_0 (\beta - 3\alpha) \Delta t] / [A_0 (1 + 2\alpha \Delta t)],$$

где  $V_0$  — номинальный объем резервуара;  $\beta$  — коэффициент объемного расширения жидкости;  $A_0$  — номинальное сечение поршня.

Если плоскость изображения смещается при изменении температуры на величину  $\Delta S$  (из-за изменения показателей преломления

<sup>1</sup> А.с. 651290 (СССР).

стекло, радиусов кривизны, толщины линз и воздушных промежутков), то коррекционное перемещение линзы 4 будет равно  $L_2 = \Delta S/K$ , где  $K$  — коэффициент влияния перемещения линзы 4 на расфокусировку объектива.

Отсюда получаем конструктивные данные для параметров термокомпенсатора (например, для соотношения длин плеч рычажного механизма)

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{V_0 (\beta - 3\alpha) \Delta t K}{A_0 (1 + 2\alpha \Delta t) \Delta S}.$$

Как показали испытания этого термокомпенсатора, качество его работы существенно зависит от попадания воздуха в полости резер-

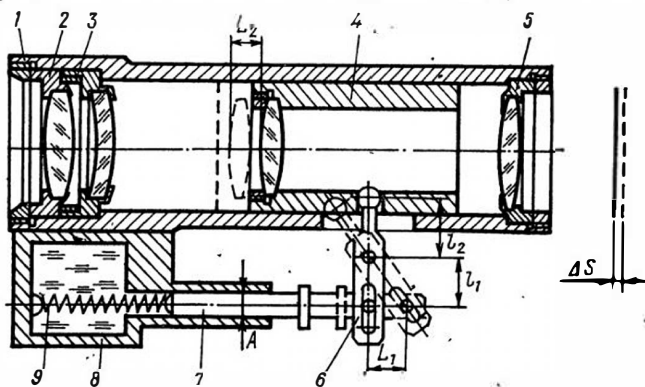


Рис. 4.6. Жидкостный термокомпенсатор объектива:

1 — корпус; 2—5 — оправы элементов объектива; 6 — двуплечий рычаг; 7 — поршень; 8 — резервуар с жидкостью; 9 — замыкающая пружина

вуара и поршня. Для устранения этого недостатка жидкость заключается в резиновый сильфон (рис. 4.7).

Широкое распространение получили также автоматические устройства, основанные на различного рода системах выработки сигнала дефокусировки, управляющего приводом фокусирующего элемента.

На рис. 4.8 изображена система<sup>1</sup>, содержащая выверитель фокусировки и компенсатор гнутый телескопа. Выверитель фокусировки содержит систему подсветки 1, 2 растровых марок 3, 4, автоколлимационный полупрозрачный отражатель 7, светоделительную призму — куб 21, пару клиньев 23, диссектор 24, электрически связанный через управляющий усилитель и контрольный индикатор 27 с приводом 5 фокусировки кассетодержателя. В кассетодержателе 6 установлена кассета (фотоприемник или спектрограф), на которой строится изображение зеркалом 20 телескопа.

При номинальной температуре выверитель фокусировки юстируется так, чтобы изображения растров проектировались через главное зеркало симметрично относительно фотокатода диссектора (кассета находится в фокальной плоскости зеркала). Амплитуды

<sup>1</sup> А. с. 591791 (СССР).

модулированных сигналов изображений растровых марок 3 и 4 при этом одинаковы, напряжение на выходе усилителя 27 отсутствует и двигатель привода фокусировки кассетодержателя не работает.

При изменении температуры появляется расфокусировка телескопа, приводящая к несимметричному изображению растров относительно плоскости фотокатода диссектора. Амплитуды сигналов будут различными (причем порядок следования большей и меньшей амплитуд зависит от знака расфокусировки) и усилитель подаст напряжение на двигатель привода кассетодержателя. Когда кассета займет положение точной фокусировки, изображения растров займут симметричное расположение относительно диссектора и двигатель остановится.

Наивысшей чувствительности выверитель расфокусировки достигает при максимальном изменении контраста в изображении

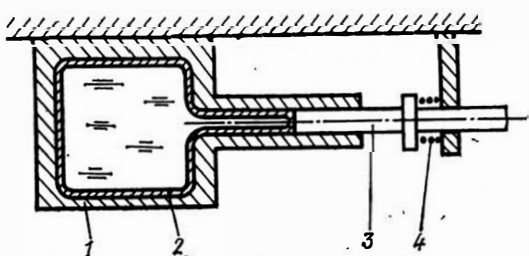


Рис. 4.7. Жидкостный резервуар с резиновым сильфоном:

1 — корпус; 2 — резиновый сильфон; 3 — поршень; 4 — замыкающая пружина

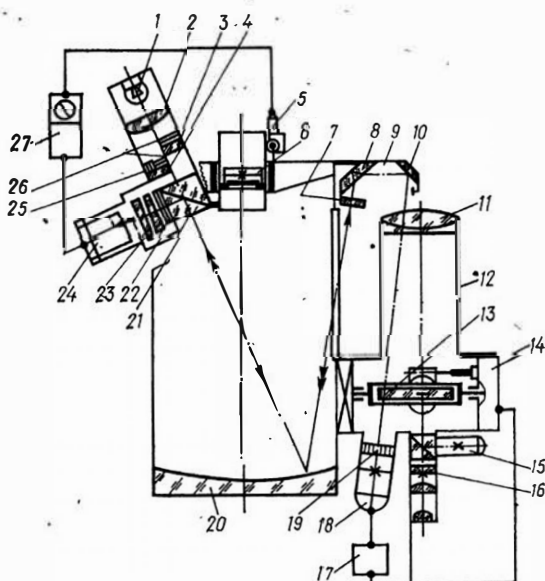


Рис. 4.8. Схема выверителя фокусировки и компенсатора гнутый телескопа

растров, которое обеспечивается при расположении растров на расстоянии  $d$  друг от друга

$$d = 2,08\lambda k / \{2\pi\sigma_A'^2 [1 - \lambda\mu / (2\sigma_A')]\},$$

где  $\lambda$  — рабочая длина волны света;  $\sigma'_A$  — задний апертурный угол выверителя фокусировки;  $\mu$  — частота раstra;  $k$  — коэффициент, зависящий от частотно-контрастной характеристики выверителя фокусировки с учетом свойств диссектора,  $k \neq 1$ .

Погрешность работы выверителя определяется точностью контроля фокусировки

$$\Delta f = \Delta m \lambda / \sigma_A'^2,$$

где  $\Delta m$  — пороговая чувствительность приемной системы к относительному изменению освещенности. При  $\Delta m = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $\sigma'_A = 1/200$ ,  $\lambda = 0,5$  мкм  $\Delta f' = 0,02$  мм.

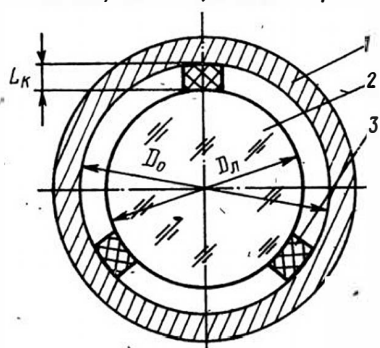


Рис. 4.9. Схема соединения объектива с оправой:

1 — оправка; 2 — объектив; 3 — термокомпенсатор

Клинья 23 образуют плоскопараллельную пластинку переменной толщины, которая вносит продольную расфокусировку изображения растров на фотокатоде диссектора на величину  $\Delta S$ , автоматически вводимую следящим приводом фокусировки в положение кассетодержателя

$$\Delta S = (n_\lambda - 1) (\pm l \operatorname{tg} \theta),$$

где  $n_\lambda$  — коэффициент преломления стекла клиньев для рабочей длины волны света;  $\pm l$  — относительное встречное параллельное смещение клиньев;  $\theta$  — угол клина.

**Компенсаторы пережатий и зазоров объективов в оправках.** Так как

коэффициенты линейного расширения материалов оптических деталей и оправ, как правило, различны, то при изменениях температуры возникает опасность недопустимых их пережатий или смещений в зазорах. Особенно важно учитывать это при креплении крупногабаритных зеркал и линз, работающих при значительных перепадах температуры. Для предупреждения этого между наружным диаметром линзы (зеркала) и ее оправой устанавливают термокомпенсаторы. Расчет термокомпенсатора (рис. 4.9) производится на основании следующей зависимости:

$$2L_K \alpha_K \Delta t = D_0 \alpha_0 \Delta t - D_\lambda \alpha_\lambda \Delta t,$$

где  $L_K$  — размер компенсатора;  $D_0$  — диаметр оправы;  $D_\lambda$  — диаметр линзы;  $\alpha_K$ ,  $\alpha_0$ ,  $\alpha_\lambda$  — коэффициенты линейного расширения материалов компенсатора, оправы и линзы соответственно;  $\Delta t$  — изменение температуры. Так как  $D_0 = D_\lambda + 2L_K$ , то

$$L_K = D_\lambda (\alpha_0 - \alpha_\lambda) / [2(\alpha_K - \alpha_0)]. \quad (4.4)$$

На практике получили распространение две конструкции таких термокомпенсаторов. На рис. 4.10 изображено устройство для крепления крупногабаритного объектива с термокомпенсаторами, состоящими из вкладышей 1, привинченных к накладкам 2, которые кре-

пятся болтами к оправе объектива. Вкладыш изготавливают из оргстекла СОЛ ( $\alpha \approx 9 \cdot 10^{-5}$ ) или винипласта ВН ( $\alpha \approx 7 \cdot 10^{-5}$ ). В процессе сборки результативной обработкой вкладыша по конкретному диаметру линзы (или с помощью прокладок и подшабривания корпуса) добиваются соединения линзы с термокомпенсатором без зазора (либо с небольшим зазором, равным 3—5 мкм). Для фиксации линзы в отверстия термокомпенсаторов заливают герметик. Число компенсаторов по периметру линзы зависит от ее массы и достигает в крупногабаритных системах 12—16 и более.

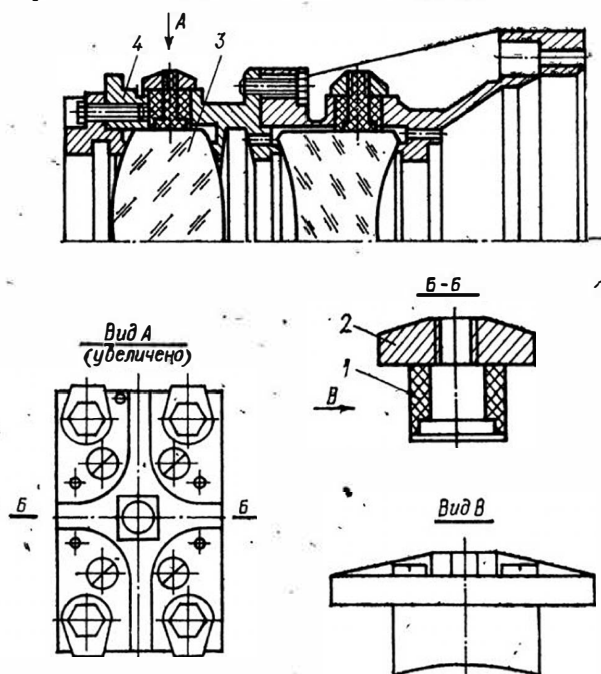


Рис. 4.10. Крепление объектива с термокомпенсаторами:

1 — термокомпенсационный вкладыш; 2 — накладка; 3 — линза; 4 — оправа

На рис. 4.11 изображен термокомпенсатор в сборе с зеркалом телескопа. Термокомпенсаторы установлены по периметру оправы (на рисунке приведена часть конструкции). Они представляют собой набор вставленных друг в друга цилиндрических втулок, изготовленных из двух материалов с различными коэффициентами линейного расширения. Замыкание термокомпенсатора на поверхность зеркала осуществляется регулировкой винта 1 с последующей фиксацией. Сборка цилиндрических втулок осуществляется так, чтобы не возникали заклинивания и заедания. Ролик 2 обезжиривается, так как попадание смазки на поверхность зеркала недопустимо.

Известны также конструкции, где роль термокомпенсатора при небольших отличиях коэффициентов линейного расширения оправы

и материала линзы выполняет герметик или норакрил [14]. При осуществлении такого метода компенсации следует обратить внимание на то, что слишком тонкие слои герметика ( $\approx 10$  мкм) теряют свои эластичные свойства, т. е. эффективность компенсации снижается. Для устранения возможного затекания герметика в небольшие зазоры (между линзой и оправой объектива) отверстия в корпусе оправы объектива под заливку герметика следует выполнять со специальными карманами (см. рис. 4.21).

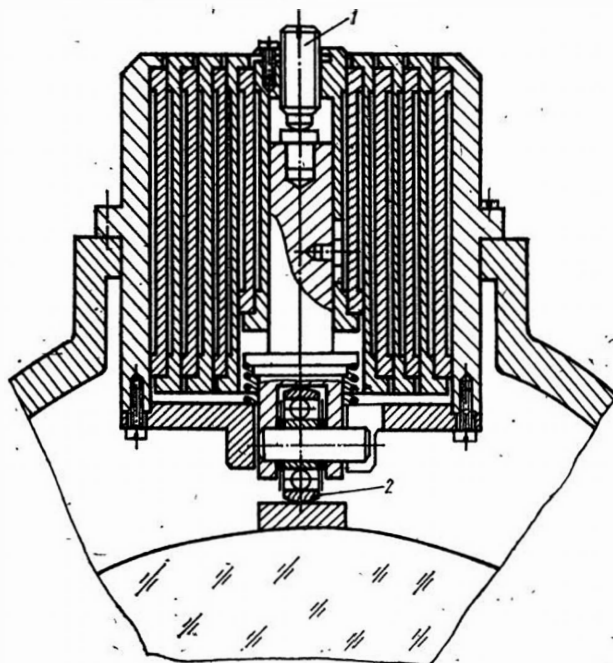


Рис. 4.11. Термокомпенсатор зеркала объектива большого диаметра.

В том случае, когда оправа линзы имеет существенное отличие коэффициента линейного расширения материала (из-за стремления подобрать его близким по значению к коэффициенту линейного расширения материала линзы) от аналогичного коэффициента корпусной детали, между ними также устанавливают термокомпенсатор, в качестве которого используют вкладыши, рассчитанные по формуле (4.4), либо гофрированные плоские пружины. На рис. 4.12, приведена часть конструкции объектива с такими термокомпенсаторами. Здесь значения коэффициентов линейного расширения материалов линзы 1 и оправы 2 мало отличаются друг от друга. Небольшое относительное изменение их диаметров при перепаде температуры компенсируется упругими свойствами герметика 4, посредством которого линза связана с оправой. Коэффициент линейного расширения материала корпуса  $\alpha_k$  существенно отличается от  $\alpha_o$ , так как

он подобран в соответствии с значением  $\alpha$  зеркала (на рисунке не показано), закрепленного в нем.

Компенсация изменений диаметров оправы линзы и корпуса производится с помощью гофрированных упругих секторных пластин 7, зажатых между наружными 6 и внутренними 5 кольцами, привинченными соответственно к корпусу и оправе.

Компенсатор увода нуля градуировочной кривой спектрального прибора. В спектральных приборах, использующих в качестве диспергирующего элемента призмные системы, при изменении температуры возникает сбой нуля шкалы. Эта погрешность обус-

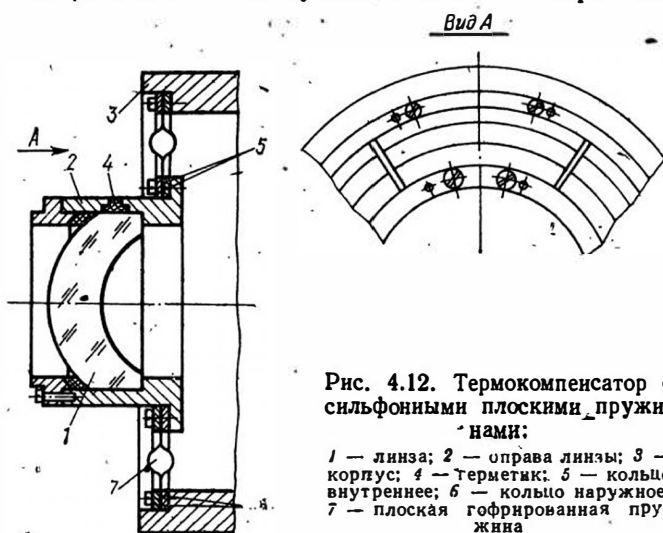


Рис. 4.12. Термокомпенсатор с сильфонными плоскими пружинами:

1 — линза; 2 — оправка линзы; 3 — корпус; 4 — термометр; 5 — кольцо внутреннее; 6 — кольцо наружное; 7 — плоская гофрированная пружина

ловлена главным образом изменением показателя преломления диспергирующей призмы и проявляется уже при изменении температуры всего на несколько градусов.

Рассмотрим термокомпенсатор, применяемый для коррекции такой погрешности в спектрофотометре СФ-16 (рис. 4.13). Шкала 1 прибора связана с диспергирующей кварцевой призмой 6, установленной на поворотном столе 7 посредством кинематического привода, состоящего из зубчатых колес 2, 3, винтовой передачи 4 и рычага 5. Дисперсия монохроматора от 185 до 1200 нм, что осуществляется разворотом призмы на угол  $5^\circ 33' 57''$ .

При изменении температуры на  $\pm 5^\circ$  от номинальной (что допускается условиями эксплуатации прибора) показатель преломления кварца изменяется (например, для линии  $e$  на величину  $\Delta n_e = \beta_e n_e \Delta t = 104 \cdot 10^{-7} \cdot 1,46028 \cdot 5 = \pm 76 \cdot 10^{-6}$ ).

Изменению показателя преломления на величину  $\Delta n$  соответствует поворот призмы на угол  $d_i$  [29]

$$d_i = \sin A \Delta n / \sqrt{1 - n^2 \sin^2 A}.$$

где  $A$  — предомляющий угол призмы.

Следовательно, на такой угол нужно автоматически доворачивать призму, чтобы компенсировать изменение ее показателя преломления при изменении температуры. При  $\Delta t = \pm 5^\circ$  дополнительный поворот составляет  $10''$ . В качестве компенсатора используется биметаллический рычаг 5, изменение радиуса кривизны которого приведено на рис. 4.14 (а, б). При изменении температуры рычаг изгибается, доворачивая стол с диспергирующей призмой. Расчет рычага про-

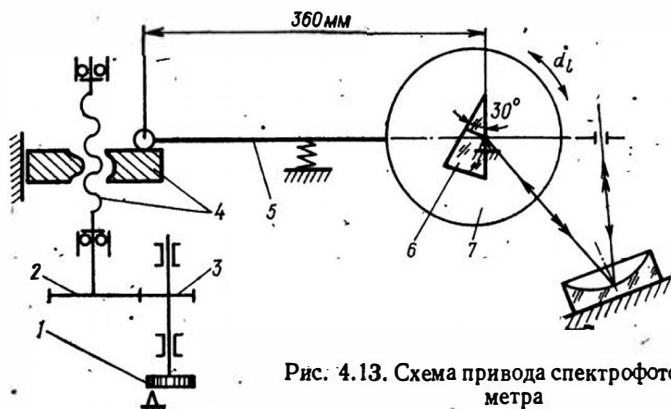


Рис. 4.13. Схема привода спектрофотометра

изводится из условия, чтобы поворот его сечения при  $\Delta t = \pm 5^\circ$  был равен  $\pm 10''$ .

• Если пластина 1 изготовлена из алюминия ( $\alpha_1 = 26 \cdot 10^{-6}$ ) или латуни ( $\alpha_1 = 18,9 \cdot 10^{-6}$ ), а пластина 2 — из стали ( $\alpha_2 = 12 \cdot 10^{-6}$ ),



Рис. 4.14. Изменение радиуса кривизны биметаллического рычага: а — при номинальной температуре (+20 °C); б — при увеличении температуры выше номинальной

то при увеличении температуры будет происходить изгиб рычага с вогнутостью со стороны стальной полосы (при уменьшении температуры от номинальной — наоборот).

Радиус кривизны такой балки [42] определим по формуле

$$r \approx \frac{1}{(\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t} \left[ \frac{(2,86h_2^3 + h_1^3)(h_1 + 2,86h_2)}{6(h_1 + h_2)2,86h_2h_1} + \frac{h_1 + h_2}{2} \right],$$

где 2,86 — коэффициент, равный отношению модулей упругости стали и алюминия. При  $h_1 = 6$  мм,  $h_2 = 32$  мм  $r = 1,3 \cdot 10^6$  мм. Тогда длина соединения пластин должна составлять  $L = 2r d_t = 130$  мм.



Так как показатель преломления призмы и его температурное приращение различны в спектральном диапазоне длин волны, а биметаллический рычаг рассчитывается для одного (среднего) значения корректировочного угла поворота призмы, то недокомпенсация не может быть сведена к минимуму на всем диапазоне работы прибора. Конструкция рычага спектрофотометра изображена на рис. 4.15. Основная пластина 4 рычага изготовлена из стали и имеет перемен-

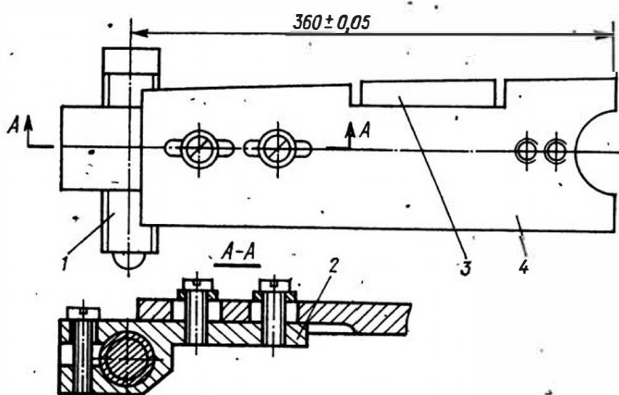


Рис. 4.15. Биметаллический рычаг спектрофотометра

ное сечение для повышения жесткости. Вставка 3 припаивается или приклеивается к рычагу. Для изменения длины рычага предусмотрена возможность подвижки кронштейна 2, а регулировка его начального положения производится перемещением винта 1.

#### 4.2. КОМПЕНСАЦИЯ ДЕЦЕНТРИРОВКИ ЛИНЗ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Под децентрировкой линзы понимается смещение центров кривизны ее оптических поверхностей с базовой оси [7]. На практике различают децентрировку первого и второго рода. Децентрировка первого рода обусловлена наклоном, косиной линзы и равна смещению центра кривизны поверхности с базовой оси на величину  $\Delta C_v^I \approx R_v \Delta \gamma$ , где  $R_v$  — радиус кривизны поверхности;  $\Delta \gamma$  — угол наклона линзы. Децентрировка второго рода вызвана поперечным смещением линзы с базовой оси и равна этому смещению для обеих поверхностей:  $\Delta C_v^{II} = \Delta C$ .

Децентрировки возникают из-за погрешностей изготовления линз (разнотолщинность по краю, несовпадение центров кривизны с осью базового цилиндра), при склейке линз (клиновидность слоя клея, несовпадения оптических осей склеиваемых линз друг с другом и осью базового цилиндра), из-за погрешностей изготовления оправ (неперпендикулярности опорных торцев, эксцентриситетов посадочных диаметров), а также вследствие сдвигов и наклонов линз и их оправ в зазорах соединений при сборке. Децентрировка линз при-

водит к появлению комы, хроматизма, астигматизма, наклону плоскости изображения и другим aberrациям оптической системы. В бинокулярных приборах возникает непараллельность визирных осей.

Исходя из aberrаций децентрированных оптических систем, при расчете определяют допуски на центровку линз системы. При этом в связи с тем, что обеспечение вычисленных допусков часто является трудно осуществимой задачей, расчетчик вместе с конструктором и технологом решают вопрос о необходимости применения компенсаторов децентрировки, перераспределении допусков и методике юстировки объектива.

Прежде чем перейти к типовым компенсаторам децентрировок линз, следует отметить, что вопрос о допусках на их центровку в несложных оптических системах, необходимость введения компенсаторов и чувствительность подвижки могут быть решены исходя из упрощенных формул, связывающих децентрировку с допустимой комой и хроматизмом [21, 32, 37].

Для одиночной линзы допустимая децентрировка второго рода и ее наклон [32] определим по формуле

$$\Delta C^{\text{II}} = \Delta F \cdot C \cdot v f' / D; \quad \Delta \gamma = 2n \Delta \sigma_k / [3(n^2 - 1) \sigma_A^2 (\beta^2 - 1) W],$$

где  $\Delta F \cdot C$  — волновой допуск на угловой хроматизм;  $v$  — коэффициент дисперсии;  $D$  — рабочий диаметр линзы;  $\Delta \sigma_k$  — допустимое значение угловой комы;  $n$  — показатель преломления;  $\sigma_A$  — апертурный угол в пространстве изображения линзы;  $\beta$  — линейное увеличение линзы;  $W$  — угловое увеличение последующей системы.

Допуск на децентрировку  $\mu$ -й поверхности линзы оптической системы [21] найдем из выражения

$$\Delta C_{\mu}^{\text{I}} = 2n_{\mu} r_{\mu} \delta q'_{\mu} / [3(n_{\mu}^2 - 1) h_{\mu}^2 \sigma_{\mu} \beta_{\mu+1}],$$

где  $\delta q'_{\mu}$  — допустимое значение комы;  $r_{\mu}$  — радиус кривизны поверхности;  $n_{\mu}$  — показатель преломления;  $h_{\mu}$  — высота точки встречи луча с поверхностью;  $\sigma_{\mu}$  — сходимость (обратная величина расстояния до изображения);  $\beta_{\mu+1}$  — линейное увеличение последующей системы.

Допуск на хроматизм и кому отдельной линзы или поверхности находят из суммарного допуска на эти aberrации системы его делением на значение корня квадратного из числа линз или поверхностей либо с учетом коэффициента их влияния (см. п. 2.4). Суммарный допуск на визуальные оптические системы обычно принимают равным 0,1 мкм в волновой мере, либо радиусу первого дифракционного кольца [21, 32].

Типовая компенсация децентрировок линз оптических систем основана на результативной обработке оправ линз, смещении одной из линз (иногда двух и более) перпендикулярно к оптической оси, развороте и наклонах линз, устраняющих (уменьшающих) саму децентрировку, либо создающих aberrации, равные, но с противоположным знаком по сравнению с компенсируемыми aberrациями всей системы.

**Результативная обработка оправ линз.** При сборке линз. возможную децентрировку их по отношению друг к другу уменьшают результативной обработкой оправ. При этом устраняется влияние погрешностей изготовления и сборки линзы и оправы. Этот технологический метод компенсации достаточно подробно изложен в литературе [9]. Суть его заключается в том, что оправа линзы изготавливается с припуском и окончательно обрабатывается в размер (после сборки с линзой) от оптической оси линзы. Обработка производится на токарном станке со специальным патроном, позволяющим совместить оптическую ось линзы с осью шпинделя станка (рис. 4.16). Перемещающая часть патрона 2 перпендикулярно к оси шпинделя станка,

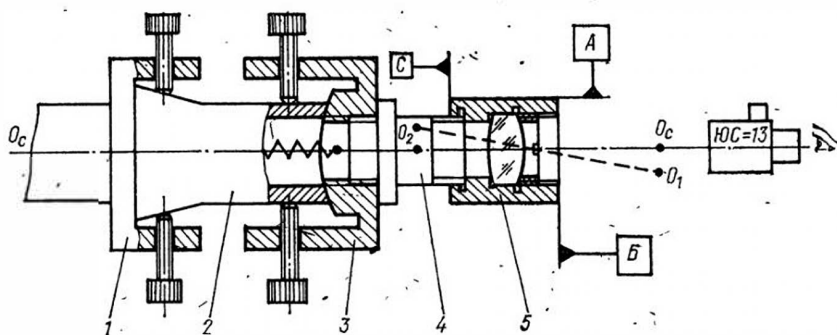


Рис. 4.16. Схема устройства центрировочного патрона:

1 — часть патрона, навинчиваемая на шпиндель станка; 2 — смещающаяся часть патрона; 3 — поворачиваемая часть; 4 — переходник; 5 — оправка линзы

совмещают центр кривизны поверхности  $O_1$  с осью шпинделя станка, наблюдая за ее биением в автоколлимационную центрировочную трубку Завелина (ЮС-13). Затем, поворачивая часть патрона 3 вокруг центра его сферы, приводят центр кривизны второй поверхности линзы  $O_2$  на ось шпинделя станка. Для того чтобы не сбивалась установка центра  $O_1$ , он должен находиться в одной плоскости с центром сферической части патрона. Это требование осуществляется с помощью сменных переходников 4. После совмещения оптической оси линзы с осью шпинделя станка базы оправы А, В и С обрабатывают в номинальный размер. При этом компенсируется децентрировка линзы, обусловленная зазором в посадке, перекосом опорного торца и собственным эксцентриситетом.

Остаточная децентрировка линзы относительно базовой оси оправы определяется погрешностью совмещения центров ее кривизны с осью шпинделя станка, биением шпинделя станка и деформацией патрона.

Особенно сильное влияние оказывают деформации патрона при больших размерах переходников и крупногабаритных линзах. В этом отношении лучшим является центрировочный патрон, представленный на рис. 4.17. Его достоинством является более высокая жесткость и возможность центрировки менисков с любым располо-

жением их центров кривизны относительно сферической части патрона. Совмещение оптической оси линзы с осью шпинделя станка здесь производится поворотами частей патрона вокруг центров сферы неподвижной части (находится всегда на оси шпинделя)  $O_{c1}$  и подвижной части  $O_{c2}$ .

Другим приемом, который можно отнести к рассматриваемому методу, является совмещение оптической оси линзы с осью шпинделя станка (с которой совпадает ось наружной, базовой поверхности оправы, имеющей номинальный размер) путем перемещения и наклонов линзы за счет зазора в посадке при ее завальцовке или приклеивании. При креплении крупногабаритных линз ответствен-

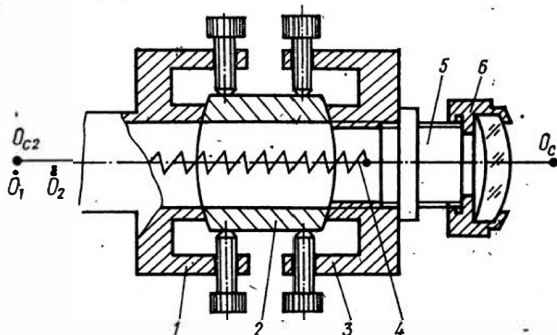


Рис. 4.17. Центрировочный патрон, разработанный ГОИ им. С. И. Вавилова:

1 — часть патрона, навинчиваемая на шпиндель станка; 2 — сферическая часть патрона; 3 — часть патрона, соединяемая с переходником; 4 — пружина; 5 — переходник; 6 — оправа линзы

ных систем, результивная обработка оправы ведется по конкретным, измеренным размерам линзы.

Результивная обработка оправ линз позволяет обеспечить требуемое качество некоторых оптических систем. Однако из-за наличия остаточных эксцентриситетов, обусловленных неточным совмещением оптической оси линзы с осью шпинделя станка, биением шпинделя станка, а также из-за зазоров в посадках оправ линз в корпус и погрешностей самого корпуса качество многих систем (например, микрообъективов, работающих с большим увеличением и апертурой, кино- и фотообъективов) обеспечить, применяя только этот метод, не удается. В этом случае применяют конструктивные методы компенсации децентрировок.

**Компенсация сдвигом линз.** Для выполнения этого метода компенсации необходимо предусмотреть возможность перемещения одной из линз перпендикулярно к оптической оси с одновременным контролем качества изображения оптической системы. Перемещение линзы обеспечивается созданием зазора между ее оправой и корпусом, установкой прокладок между линзой и оправой, либо специальной конструкцией оправы линзы (см. рис. 1.21). Контроль качества изображения производится, как правило, по дифракционному изобра-

жению точки или изображению мира, создаваемому корректируемой системой.

В том случае, когда оптическая система имеет большое количество линз, перемещение одной из них создает абберацию противоположного знака по отношению к суммарной абберации других компонентов. При этом важное значение имеет правильный выбор линзы, с помощью которой будет производиться компенсация. Это объясняется тем, что компоненты системы оказывают различное влияние на приращение абберации при их смещении. Одни линзы практически нечувствительны к смещениям и поэтому не могут создать

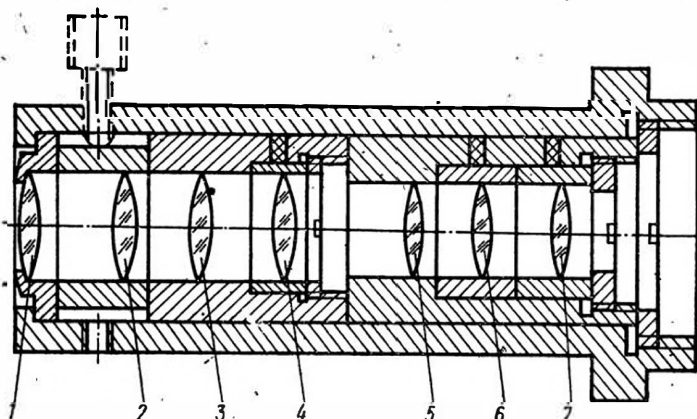


Рис. 4.18. Конструкция микрообъектива, разработанного ГОИ им. С. И. Вавилова

нужной компенсирующей абберации, другие, наоборот, слишком чувствительны и требуют сложной, тщательной регулировки и фиксации. Выбор коррекционного элемента целесообразно производить на основе анализа влияния децентрировок линз системы на приращение абберации. Такой анализ позволяет конструкторам не только выбрать коррекционную линзу разрабатываемой конструкции объектива, но и сделать его малорасстраивающимся при тряске и вибрации.

На рис. 4.18 изображена схема конструкции аналогичного объектива. Ниже приведены данные о влиянии децентрировки его элементов на кому.

| Номер элемента             | 1    | 2     | 3      | 4     | 5     | 6      | 7     |
|----------------------------|------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Кому при $\Delta C = 0,01$ | 0,02 | 0,049 | -0,105 | 0,086 | 0,074 | -0,182 | 0,082 |

Из приведенных данных видно, что абберации 3- и 4-го элементов, а также 5-, 6- и 7-го компенсируют друг друга, поэтому, связав оправы 3 и 4 (а также 5, 6 и 7) элементов друг с другом и зафиксировав их (например, с помощью герметика или цемента), получают конструкцию, устойчивую к децентрировкам. В качестве компенсирующего выбран элемент 2, оправа которого посажена в корпус

с небольшим зазором и может смещаться с помощью четырех шпилек, ввинчиваемых в корпус при юстировке.

В некоторых объективах бывает иногда трудно найти одиночную линзу, позволяющую с нужной чувствительностью произвести коррекцию. В этом случае подбирают такие две линзы, как правило, с положительным и отрицательным влияниями, которые конструктивно объединяют в один компонент, смещаемый перпендикулярно к оптической оси системы. Если оптическая система содержит два-три компонента, то смещением одного из них производится по сути

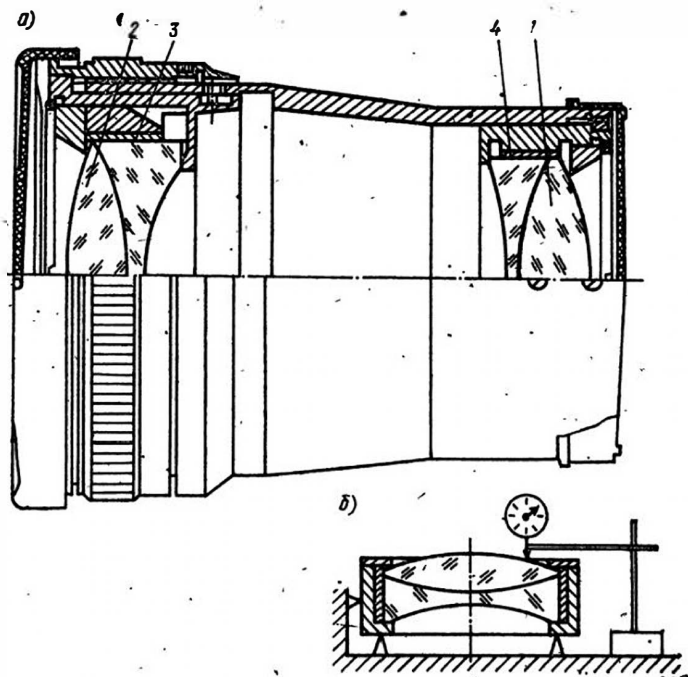


Рис. 4.19. Центрировка линз анаморфотной насадки:  
1, 2 — цилиндрические линзы; 3, 4 — компенсационные прокладки

ее центрировка. Типичным примером этого является центрировка линз анаморфотной насадки (рис. 4.19) к кинопроекционному объективу. Здесь блоки 1 и 2 цилиндрических линз вначале центрируются относительно своих оправ. Центрировка осуществляется с помощью изменения размера прокладок 3 и 4. Нужный размер прокладок получают подбором или обработкой (шабрением). Вершина цилиндрической линзы должна совпадать с осью наружной оправы. Контроль центрировки может осуществляться с помощью индикатора по равенству его минимального показания при повороте на  $180^\circ$  оправы с линзой, поджатой к призматическому или ножевидному упору (см. рис. 4.19, б). Контролируют качество изображения собранной насадки при рассмотрении в микроскоп изображения мира кол-

лиматора через юстируемую насадку и объектив. Если при выставленных параллельно образующих цилиндров блоков 1 и 2 качество изображения мира будет неудовлетворительным, то производят дополнительную центрировку одного из блоков.

Еще одним примером может служить юстировка узла с тремя последними линзами объектива «Агат-14» (рис. 4.20). Как было показано выше (см. табл. 1.1), именно децентрировки этих линз (особенно последних двух) оказывают основное влияние на качество всего объектива. На практике центрировку этого узла осуществляют сдвигом оправы линзы 3 в пределах зазора в посадке (постукиванием), добиваясь качественного изображения дифракционной точки, созда-

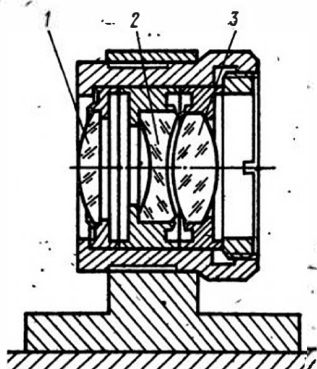


Рис. 4.20. Схема узла объектива «Агат-14»

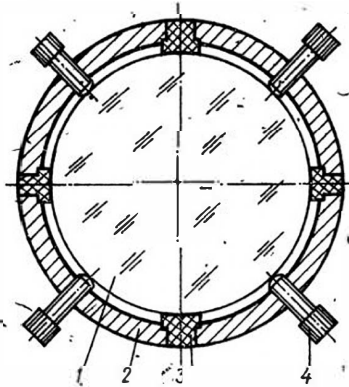


Рис. 4.21. Схема центрировки крупногабаритной линзы сдвигом с последующей фиксацией герметиком

ваемого этим узлом. Так как влияние децентрировки линзы 1 на поперечные aberrации существенно меньше, чем влияние линз 3 и 2, то по сути здесь производится центрирование линзы 3 по линзе 2.

Весьма часто применяют сдвиг линз для центрировки крупногабаритных объективов. Обычно такие линзы центрируют относительно базовой оси оправы сдвигом, за счет зазора в посадке с последующей фиксацией герметиком или норакрилом (рис. 4.21). Линзу 1 смещают в зазоре винтами 4, добиваясь совмещения ее оси с базовой осью оправы 2. После этого отверстия в оправе заполняют герметиком 3 и выдерживают некоторое время, необходимое для его полимеризации. В том случае, когда значения коэффициентов линейного расширения материалов оправы и линзы существенно различаются, между оправой и линзой помещают термокомпенсаторы (см. рис. 4.10). Тогда центрировка линзы производится за счет зазора между термокомпенсатором и линзой. Для фиксации положения линзы эффективным является применение норакрила-65 [14]. Недостатком такого метода центрировки является деформация линзы из-за усадки клея при полимеризации и сильной адгезии к стеклу. Для устранения этого недостатка на поверхность линзы помещают

фторопластовую пленку (толщиной около 50 мкм) или липкую ленту, которые устраняют адгезию клея к стеклу.

Отметим, что чувствительность смещения корректировочных линз определяется допустимым значением остаточных aberrаций ( $\Delta m$ ), т. е. допустимой недокомпенсацией и коэффициентом влияния  $K$ :  $\Delta C_{\min}^{\text{II}} = \Delta m / K$ .

Поперечным сдвигом линз оптических систем производят также юстировку параллельности оптических осей бинокулярных приборов, осуществляют регулировку направления визирных осей относительно баз. Типичными примерами такой коррекции являются смещения в двойной эксцентриковой оправе объективов биноклей

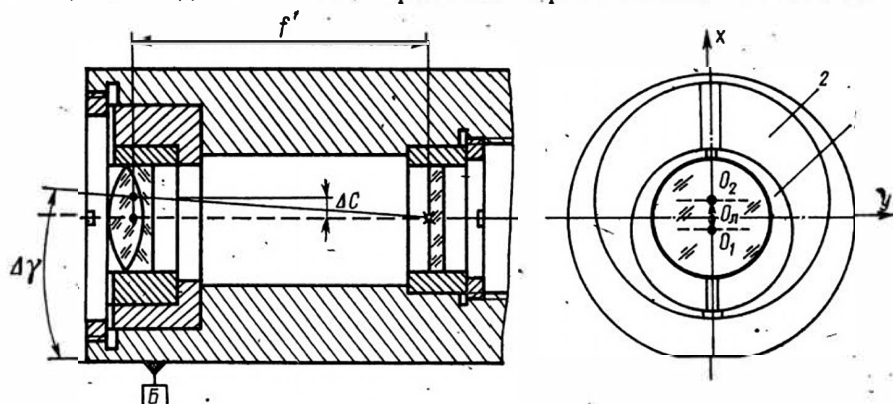


Рис. 4.22. Смещение объектива зрительной трубки для установки визирной оси параллельно базе (основанию) с помощью эксцентриковых оправ 1 и 2

для обеспечения параллельности оптических осей трубок, объективов автоколлиматоров для обеспечения перпендикулярности визирной оси к торцу трубы, объективов прицелов, зрительных труб, коллиматоров для установки визирной оси параллельно базовой поверхности.

Чувствительность смещения объектива определяют допустимым значением непараллельности (неперпендикулярности) (рис. 4.22).

$$\Delta C_{\min} = f' \Delta \gamma$$

Эксцентриситеты оправ 1 и 2 обычно равны друг другу, а их значение должно быть достаточным для компенсации максимально возможной погрешности. Перемещение узловой точки объектива возможно в любое положение относительно осей  $x$  и  $y$  в пределах двойного эксцентриситета оправ.

На рис. 4.23 изображена схема установки для выставления параллельности оптических осей системы смены увеличения стереоскопического микроскопа МССО. Система смены увеличения 1, состоящая из двух пар галилеевских трубок с увеличением  $1,6\times$  и  $3\times$ , смонтированных в цилиндрическом барабане, устанавливается на контрольно-юстировочное приспособление 2, содержащее коллиматор 4 и зрительную трубу 3. Вначале юстируют телескопичность



трубок подвижной вдоль оси отрицательных компонентов, добиваясь резкого изображения марки коллиматора. Затем подвижкой их перпендикулярно к оптической оси (в пределах зазора посадки) устанавливают оптические оси трубы параллельно друг другу и перпендикулярно к оси вращения, контролируя отсутствие двоения изображения марки коллиматора и ее смещение с марки (перекре-

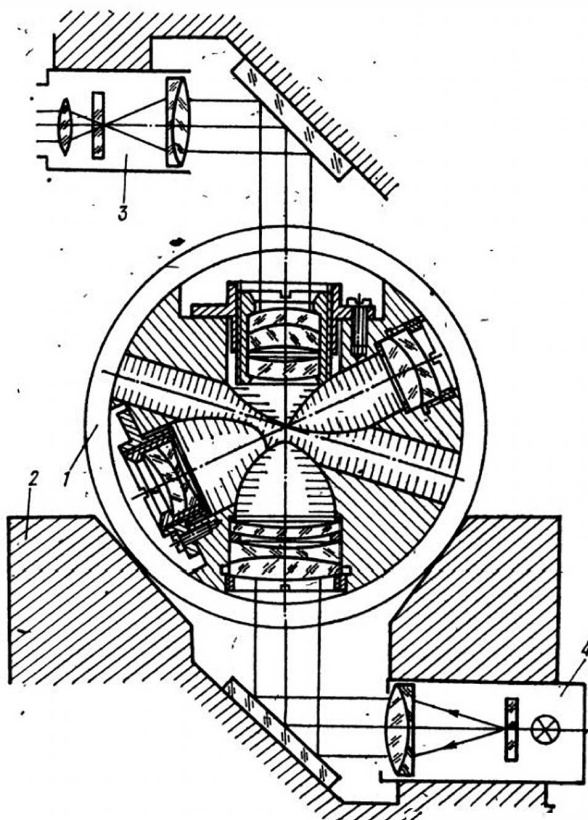


Рис. 4.23. Схема установки для юстировки системы смены увеличения

стия) сетки трубы. Так как допуск на параллельность осей пучков лучей, исходящих из одной точки, для бинокулярной насадки равен  $15'$  (в вертикальной плоскости), то чувствительность подвижки

$$\Delta C_{\min} = \Delta \alpha f' / \Gamma,$$

где  $f'$  — фокусное расстояние смещаемого компонента системы смены увеличения;  $\Gamma$  — увеличение последующей системы бинокулярной насадки. При  $\Gamma = 8\times$ ,  $f' = 20$  мм  $\Delta C \approx 0,012$  мм.

**Компенсация погрешностей посредством разворота линз.** В связи с тем, что децентрировки линз представляют собой векторные величины, то, разворачивая линзу или несколько линз оптической си-

стемы вокруг базовой оси, можно компенсировать влияние их децентрировок. Этот прием используется при сборке объективов теодолитов [11], фотограмметрических [27] и крупногабаритных объективов. Компенсация происходит также благодаря улучшению взаимного центрирования компонентов, либо изменением знака аберраций отдельных составляющих. Эффективность компенсации в существенной мере зависит от его конструкторской и технологической подготовки.

В качестве примера обоснованной подготовки этого метода рассмотрим компенсацию тангенциальной дисторсии фотограмметрического объектива [27]. Тангенциальная дисторсия отдельного элемента объектива зависит от вектора его децентрировки и является

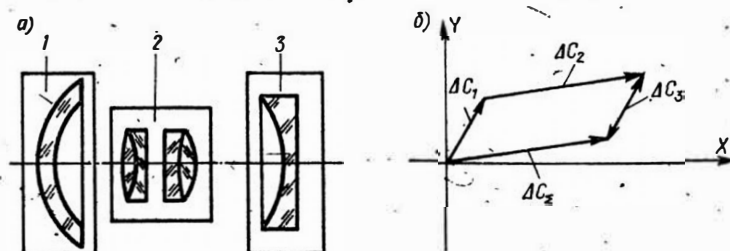


Рис. 4.24. Юстировка фотограмметрического объектива для устранения тангенциальной дисторсии: а — схема конструкции объектива; б — векторы децентрировок компонентов ( $\Delta C_2$  — основного;  $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_3$  — юстировочных;  $\Delta C_x$  — суммарный вектор)

векторной величиной, поэтому суммарный вектор тангенциальной дисторсии всего объектива будет определяться направлением векторов децентрировки его компонентов.

Следовательно, разворачивая линзы объектива, можно найти такие направления их децентрировок, что суммарный вектор тангенциальной дисторсии будет равен нулю. Задача поиска этих направлений может быть упрощена при конструктивном группировании компонентов объектива в три элемента (рис. 4.24, а): основной (2) и два юстировочных (1 и 3). Такое решение обусловлено известным свойством трех векторов: если модуль одного вектора эквивалентной децентрировки одного из них не больше суммы модулей двух других, то всегда можно найти такие их направления, что суммарный вектор будет равен нулю (рис. 4.24, б). Для обеспечения возможности контроля положения этих элементов наносят риски на их оправках и метку на корпусе объектива. Юстировка производится на оптической скамье, либо на специальной установке путем измерения вектора-максимальной тангенциальной дисторсии объектива при разворотах юстировочных элементов. Установка содержит измерительную сетку (с рядом радиусов-векторов), установленную в фокальной плоскости объектива, и зрительную трубу с окулярным микрометром. Окончательное положение элементов объектива, позволяющее компенсировать тангенциальную дисторсию, определяют непосредственным измерением на векторной схеме, которую строят по

результатам измерения, либо вычислением по координатам векторов.

Другим примером такого метода центрировки служит юстировка объектива «Мезон-2А»<sup>1</sup>. На рис. 4.25 изображен узел крепления первых двух линз этого объектива, спроектированный с возможностью компенсации поперечных aberrаций от децентрировки поверхностей линз путем их разворота. Компенсация основана на том,

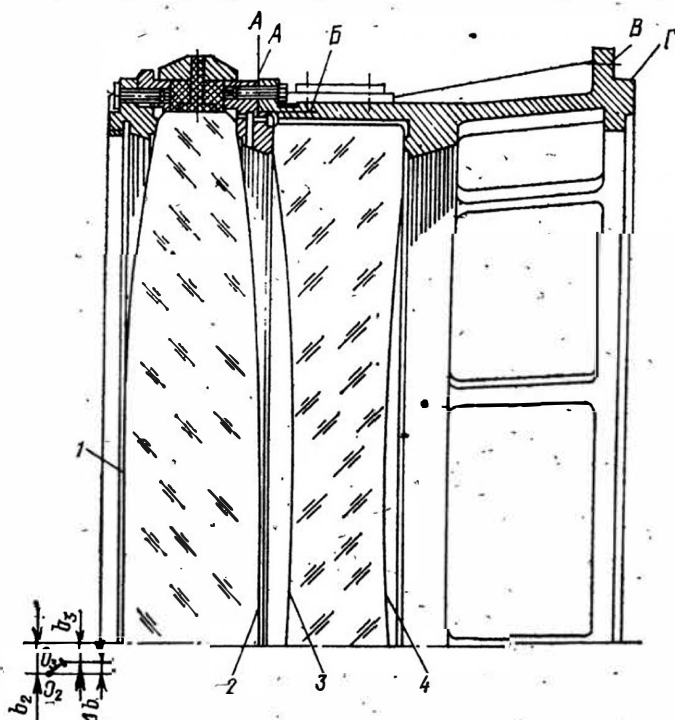


Рис. 4.25. Схема центрирования линз объектива

что значения коэффициентов влияния децентрировок оптических поверхностей на aberrации примерно равны, но противоположны по знаку. В связи с этим, если центры кривизны таких поверхностей будут приблизительно совпадать, то суммарная aberrация из-за децентрировки не превысит допуска. Для этого линзы устанавливают в оправе так, чтобы децентрировка поверхностей 1 и 4 относительно сборочных баз А, Б, В, Г не превышала допуска, а децентрировка поверхностей 2 и 3 (размеры  $b_2$  и  $b_3$ ) отличалась друг от друга не более, чем на величину  $\Delta b$ , равную сумме расчетных допусков на децентрировку этих поверхностей. После этого, соединяя оправы, разворачивают их так, чтобы направления децентрировок совпадали. Контроль осуществляют с помощью автоколлимационной трубки

<sup>1</sup> А. с. 539285 (СССР).

Забелина, по сетке которой определяют расстояние между центрами кривизны поверхностей.

**Компенсация наклоном линз.** Этот метод компенсации применяют на практике реже, так как для своей реализации он требует более сложных конструкторских решений и устройств, а также обеспечения высокой чувствительности наклона линз, вызывающей смещение центров кривизны поверхностей линзы с базовой оси на величину  $\Delta C^1 \approx \Delta \gamma R$ .

Чаще всего наклоны элементов используют при центрировке зеркальных и зеркально-линзовых объективов. На рис. 4.26 пред-

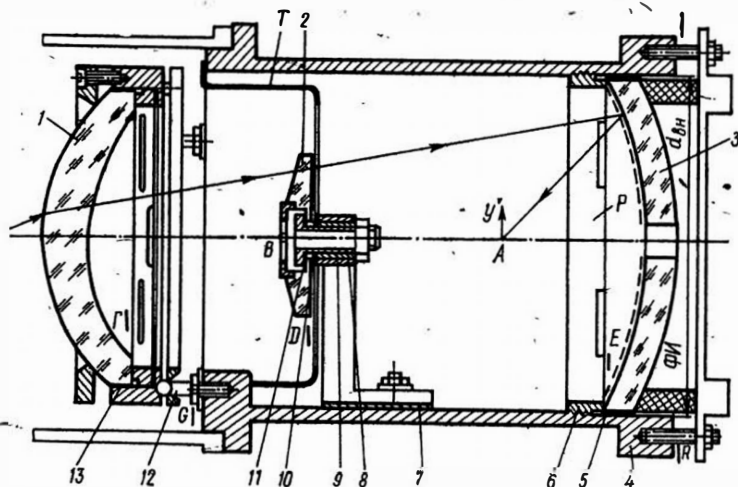


Рис. 4.26. Схема центрировки зеркально-линзового объектива посредством наклона линз

ставлена конструкция зеркально-линзового объектива, центрировка которого осуществляется наклонами мениска 1 и компенсатора aberrаций 2, сферического зеркала 3 [4]. Сначала центрируют компенсатор aberrаций относительно базовых поверхностей  $G$ ,  $R$  и внутреннего диаметра  $\Phi$ И корпуса 4. Совмещение вершины  $B$  конической поверхности компенсатора с осью внутреннего цилиндра корпуса осуществляется разворотом эксцентриковых втулок 8 и 9, а установка параллельности поверхностей  $D$  и  $G$  — наклоном компенсатора с помощью прокладок 7 (грубо) и 10, 11 (точно). Центрировка зеркала 3 обеспечивается технологическими допусками на перпендикулярность торца  $E$  к его оси перпендикулярностью трех опорных выступов  $P$  кольца 6 и при необходимости прокладками 5.

Мениск центрируют наклонами его оправы с помощью винтов 12 и перемещением в оправе прокладками 13. Чувствительность наклонов (например, для мениска) определяют исходя из допустимого значения несовпадения центра его кривизны ( $\Delta C_d$ ) с точкой  $B$  компенсатора

$$\Delta \gamma_{\min} = \Delta C_d / (R - l),$$

где  $R$  — расстояние от поверхности мениска до центра его кривизны;  $l$  — расстояние от точки поворота оправы мениска до его поверхности.

На рис. 4.5 представлен пример крепления сферического зеркала телескопа в оправе с обеспечением центрировки путем его сдвигов оправы винтами 1 и наклонов винтами 5.

Наклонами относительно оправы центрируют плоско-выпуклые крупногабаритные линзы (рис. 4.27). Центрировка заключается в том, что плоскую поверхность линзы устанавливают юстировочными винтами 3 параллельно базовой поверхности оправы (либо перпендикулярно к оси наружного цилиндра), наклоняя ее вокруг центра сферической поверхности. Отцентрированную таким образом линзу фиксируют герметиком. Для повышения надежности крепления смещение линзы вдоль оси ограничивают резьбовым кольцом. Резьбовое кольцо в случае опоры на поверхность линзы может нарушить ее центрировку, поэтому его затягивают на буртик оправы. Прокладка 6 обеспечивает минимальный осевой зазор (или незначительный натяг) соединения.

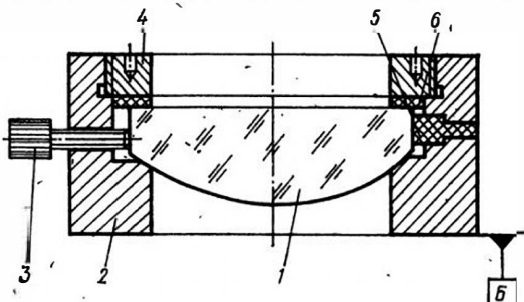


Рис. 4.27. Схема центрировки плоско-выпуклой крупногабаритной линзы посредством наклонов относительно оправы:

1 — линза; 2 — оправы; 3 — юстировочный винт; 4 — резьбовое кольцо; 5 — герметик; 6 — прокладка

#### 4.3. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ФОКУСНЫХ РАССТОЯНИЙ ОБЪЕКТИВОВ, ФОКУСИРОВКА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Погрешность фокусных расстояний объективов, окуляров и других силовых элементов оптических систем, а также погрешности их расположения вдоль оптической оси приводят к появлению расфокусировки, параллаксу, непараллельности визирных осей биноклярных приборов, погрешности масштаба изображения.

На этапе проектирования прибора в зависимости от предъявляемых требований к точности его функционирования и качеству изображения, создаваемого оптической системой, рассчитывают допуски на погрешности фокусных расстояний силовых элементов и погрешность их расположения. Этот расчет выполняют для определения возможности обеспечения указанных допусков технологическим путем или необходимости применения компенсаторов и требований к ним.

Погрешность фокусного расстояния силового элемента оптической системы зависит от отклонения показателей преломления стекол, погрешностей изготовления и сборки. Влияние каждой первичной погрешности на фокусное расстояние линзы находят дифферен-

цированием выражения для силы одиночной линзы, граничащей с воздухом:

$$\Phi = 1/f' = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2};$$

$$\Delta f'_{\Delta n} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta n} = f'^2 \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{d(n^2-1)}{n^2 r_1 r_2} \right] \Delta n \approx \frac{f'}{n-1} \Delta n;$$

$$\Delta f'_{\Delta r_1} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta r_1} = f'^2 \left[ \frac{(n-1)}{r_1^2} + \frac{d(n-1)^2}{nr_1^2 r_2} \right] \Delta r_1 \approx$$

$$\approx \frac{f'^2 (n-1) \Delta r_1}{r_1^2} \approx f'^2 (n-1) 4\lambda N_1 / D^2;$$

$$\Delta f'_{\Delta r_2} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta r_2} = f'^2 \left[ -\frac{(n-1)}{r_2^2} + \frac{d(n-1)^2}{nr_1 r_2^2} \right] \Delta r_2 \approx$$

$$\approx \frac{-f'^2 (n-1) \Delta r_2}{r_2^2} \approx -f'^2 (n-1) 4\lambda N_2 / D^2;$$

$$\Delta f'_{\Delta d} = -f'^2 \Delta \Phi_{\Delta d} = -f'^2 (n-1)^2 \Delta d / (nr_1 r_2),$$

где  $\Phi$  — оптическая сила линзы;  $n$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $d$ ,  $\Delta n$ ,  $\Delta r_1$ ,  $\Delta r_2$ ,  $\Delta d$  — конструктивные параметры линзы: показатель преломления материала, радиусы кривизны, толщина по оси и их погрешности соответственно;  $N$  — отступление радиусов кривизны поверхностей от номинала в числе колец (полос) Ньютона;  $\lambda$  — длина волны света при контроле по пробному стеклу (погрешность пробного стекла не учтена);  $D$  — световой диаметр линзы.

На этапе проектирования все первичные погрешности должны быть отнесены к случайным (за исключением  $\Delta n$ , если заранее известно, из стекла какой плавки будут изготовлены детали), поэтому суммарное отклонение фокусного расстояния тонкой линзы определим из выражения

$$\Delta f'_s \approx \sqrt{\frac{f'^2}{(n-1)^2} \delta n^2 + \left[ \frac{f'^2 (n-1)}{r_1^2} \right]^2 \delta r_1^2 + \left[ \frac{f'^2 (n-1)}{r_2^2} \right]^2 \delta r_2^2}.$$

где  $\delta n$ ,  $\delta r_1$ ,  $\delta r_2$  — половина поля рассеяния соответствующей первичной погрешности.

Для одиночного сферического зеркала с наружным отражением фокусное расстояние равно половине радиуса кривизны, поэтому

$$\Delta f'_{\Delta r} = \Delta r / 2 = f' \Delta r / r \approx 4f' r \lambda N / D^2 \approx 8f'^2 \lambda N / D^2.$$

Для склейки из двух тонких линз, учитывая условие ахроматизации  $v_1 f'_1 = -v_2 f'_2$  и слабое влияние погрешностей радиусов кривизны склеиваемых поверхностей, получим

$$\Phi_s = 1/f'_s = \Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_1 (1 - v_2/v_1);$$

$$\Delta f'_s \approx \sqrt{\left( \frac{f'_s \Phi_1}{n_1 - 1} \right)^2 \delta n_1^2 + \left[ \frac{f'_s \Phi_1 v_2}{(n_2 - 1) v_1} \right]^2 \delta n_2^2 +$$

$$+ \left[ \frac{f'_s (n_1 - 1)}{r_1^2} \right]^2 \delta r_1^2 + \left[ \frac{f'_s (n_2 - 1)}{r_2^2} \right]^2 \delta r_2^2}, \quad (4.5)$$

где  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3$  — оптические силы 1-й и 2-й линз и склейки соответственно;  $v_1, v_2, n_1, n_2$  — коэффициенты средней дисперсии и показатели преломления стекол соответственно;  $r_1, r_2$  — радиусы кривизны поверхностей, граничащих с воздухом.

Оптическая сила системы, состоящей из  $n$  тонких линз, находящихся в воздухе, равна

$$\Phi_{\Sigma} = \frac{1}{f_{\Sigma}} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{h_1} \Phi_i,$$

где  $h_1, h_i$  — высота точки падения луча на первую и  $i$ -ю линзы.

Погрешность фокусного расстояния такой системы имеет вид

$$\Delta f_{\Sigma} = \frac{\Delta f_{\Sigma}^2}{h_1} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{h_i \Phi_i}{n_i - 1} \right]^2 \delta n_i^2 + \sum_{j=2}^m \left[ \frac{h_j (n_j - 1)}{r_j^2} \right]^2 \delta r_j^2}.$$

Оптическая сила двух линз или системы линз, состоящей из двух компонентов, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга, равна

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 d. \quad (4.6)$$

В связи с этим погрешность  $d$  или его изменение на величину  $\Delta d$  приводит к погрешности или изменению фокусного расстояния системы на величину

$$\Delta f_{\Sigma \Delta d} = -f_{\Sigma}^2 \Delta \Phi_3 \Delta d = f_{\Sigma}^2 \Phi_1 \Phi_2 \Delta d. \quad (4.7)$$

Приведенные формулы используют для определения возможной погрешности фокусного расстояния системы и для решения вопроса о необходимости и диапазоне работы компенсаторов погрешности фокусного расстояния и расфокусировки (с учетом возможной погрешности расположения самой системы вдоль оптической оси). Компенсацию погрешности фокусного расстояния системы обычно производят изменением воздушного промежутка между его компонентами или с помощью селекции элементов (см. п. 1.4).

Точность компенсации при изменении воздушного промежутка определяют чувствительностью изменения воздушного промежутка [формула (4.7)] и погрешностью измерения фокусного расстояния системы (погрешностью контроля результатов корректировки).

При компенсации с помощью селекции элементов недокомпенсацию погрешностей комплектуемых систем определяют значением рассеяния их фокусных расстояний в соответствующих группах (см. рис. 1.15).

Фокусировка<sup>1</sup> изображения производится продольными смещениями фокусных или других элементов оптической системы. Максимальное перемещение определяют с помощью вышеприведенных формул, а чувствительность — чувствительностью глаза к продоль-

<sup>1</sup> Здесь мы рассматриваем расфокусировку, возникающую только из-за погрешностей изготовления и сборки элементов прибора, а также эксплуатационных погрешностей.

ным наводкам, допустимым значением параллакса или глубиной резкости.

Чувствительность глаза к продольным наводкам, мкм, равна [32]

$$\Delta T \approx 0,2/\sigma_A^2, \quad (4.8)$$

где  $\sigma_A$  — задний апертурный угол фокусируемой системы. Допустимый продольный параллакс  $\Delta p$  (расстояние между изображением и маркой сетки) можно определить для телескопической системы и отсчетного микроскопа по следующим зависимостям:

$$\Delta p = f' 250 \Delta y_{\Delta p} / (t \Gamma_{\text{ок}}); \quad (4.9)$$

$$\Delta p = \beta 250 \Delta y_{\Delta p} / (t \Gamma_{\text{ок}}), \quad (4.10)$$

где  $\beta$  — линейное увеличение микрообъектива;  $\Gamma_{\text{ок}}$  — увеличение окуляра;  $t$  — сдвиг глаза в поперечном направлении;  $\Delta y_{\Delta p}$  — допустимая погрешность измерений из-за параллакса.

Различают дифракционную, геометрическую и аккомодационную глубины резкости, одна из которых в зависимости от назначения фокусной системы и определяет искомую чувствительность наводки.

Дифракционную глубину резкости изображаемого пространства определяют для объективов, работающих на конечном расстоянии, из выражения

$$T_d \approx \lambda / (2\sigma_A^2), \quad (4.11)$$

где  $\lambda$  — длина волны света;  $\sigma_A$  — передний апертурный угол. В пространстве изображений  $T_d' \approx \lambda / (2\sigma_A'^2)$ . Геометрическую глубину резкости изображения и изображаемого пространства определяют из условия, чтобы кружок рассеяния казался наблюдателю под углом, не большим разрешающей способности глаза:

$$T_r = \pm L\psi / (\sigma_A\beta); \quad T_r' = \pm L\psi / \sigma_A', \quad (4.12)$$

где  $L$  — расстояние от наблюдателя до изображения (экрана, пленки);  $\psi$  — разрешающая способность глаза (колеблется в зависимости от условий наблюдения от 1 до 10').

Для лупы и окуляра геометрическая глубина резкости будет равна [37]

$$T_{r, л} = 2\psi 250^2 / (d\Gamma_{\text{ок}}^2) \approx 12,5 / \Gamma_{\text{ок}}^2, \quad (4.13)$$

где  $d$  — диаметр зрачка глаза.

Для проекционного объектива геометрическая глубина резкости проецируемого кадра имеет вид [19]:

$$T_{r, п} = \pm f'^2 \psi L_{\text{min}} / [(p' - 2f') D_{\text{вх}}]. \quad (4.14)$$

где  $L_{\text{min}}$  — минимальное расстояние от наблюдателя до изображения;  $p'$  — расстояние от выходного зрачка до экрана;  $D_{\text{вх}}$  — диаметр входного зрачка объектива.

Аккомодационную глубину резкости для лупы и окуляра определим по формуле [37]

$$T_{\text{ак}} \approx 250 / \Gamma_{\text{ок}}^2. \quad (4.15)$$



В литературе [37] встречаются рекомендации суммировать значения  $T_d$ ,  $T_r$ ,  $T_{ак}$  при нахождении глубины резкости изображения (или изображаемого пространства). На наш взгляд, этого делать не следует, так как эти глубины резкости имеют различную физическую природу, перекрывают друг друга и не могут суммироваться. Таким образом, чувствительность компенсатора расфокусировки должна обеспечивать изменение продольных расстояний между изображениями и сеткой (экраном, фокальной плоскостью последующей системы) в пределах от  $\Delta T$  (нижняя граница), до геометрической или волновой глубины резкости (верхняя граница). Для лупы верхней границей является аккомодационная глубина резкости.

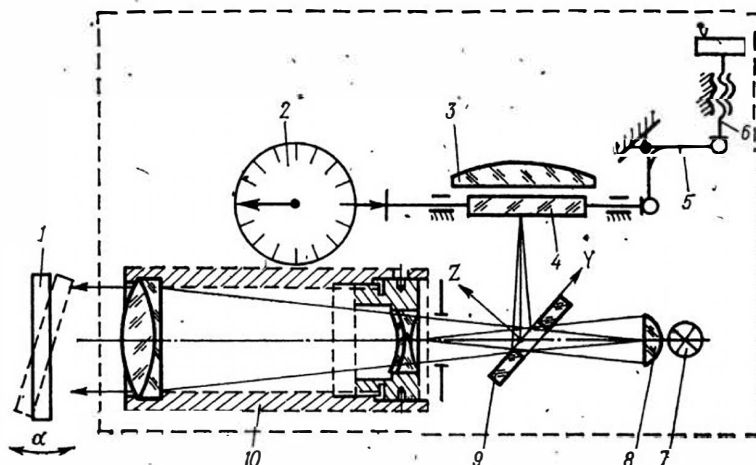


Рис. 4.28. Схема проекционного автоколлиматора

В том случае, когда фокусировку осуществляют продольным перемещением объектива, для определения чувствительности его перемещения пользуются приближенными формулами, связывающими его перемещение  $\Delta x$  с перемещением изображения  $\Delta l$  [32] — для систем с  $\beta \ll 1$ ,  $\beta \gg 1$  и  $\beta = 1$  соответственно:

$$\left. \begin{aligned} \Delta l &\approx \Delta x; \\ \Delta l &\approx -\beta^2 \Delta x; \\ \Delta l &\approx \Delta x^2 / f'. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

Рассмотрим примеры компенсации вышеперечисленных погрешностей.

Пример. На рис. 4.28 изображена схема проекционного автоколлиматора, разработанного в ЛИТМО, в котором требуется произвести фокусировку и регулировку фокусного расстояния объектива для обеспечения расчетной цены деления.

Автоколлиматор содержит телеобъектив 10, зеркало с отверстием (либо призму-куб) 9, матовый (восковой) экран 4 с биштрихом, конденсор-сетку 8, малогабаритный индикатор 2, защитную лупу 3, источник света 7, винто-рычажный привод 5, 6. При повороте отражающего зеркала 1 на некоторый угол  $\alpha$  автоколлимационное изображение штриха, нанесенного на плоскую поверхность линзы-конденсора, проектируемого телеобъективом на матовый экран, сместится на рас-

стояние  $l = f' \operatorname{tg} 2\alpha \approx 2f'\alpha$ , где  $f' = 515,46$  мм. Измерив это перемещение с помощью индикатора (при совмещении винто-рычажным приводом биштрих экрана с автоколлимационным штрихом), определяем искомое значение  $\alpha$ :  $\alpha = l/(2f') = nA/(2f') = nA''$ , где  $n$  — число отсчитанных делений индикатора;  $A = 10$  мкм — цена деления индикатора в линейной мере;  $A'' = 2''$  — цена деления шкалы индикатора в угловой мере.

Погрешность измерения  $\alpha$  из-за погрешности фокусного расстояния равна

$$\Delta\alpha_{\Delta f'} = -l \Delta f' / (2f'^2) = -\alpha \Delta f' / f'.$$

Если допустить, что величина  $\Delta\alpha_{\Delta f'}$  не более одного деления на всем диапазоне измерений ( $\alpha_{\max} = 30'$ ), получим  $\Delta f' = \Delta\alpha_{\Delta f'} \cdot f' / \alpha_{\max} = 2'' \cdot 515,46 / 30' = 0,57$  мм.

Регулировку фокусного расстояния телеобъектива производим перемещением вдоль оси его отрицательного компонента. Используя формулу (4.7), находим чувствительность перемещения этого компонента

$$\Delta d = \Delta f' / (f'^2 \Phi_1 \Phi_2) \approx 2,2 \text{ мкм}.$$

Здесь  $\Phi_1 = 1/86,13$ ;  $\Phi_2 = -1/11,37$  — оптические силы положительного и отрицательного компонентов соответственно. Чувствительность перемещения компонента,

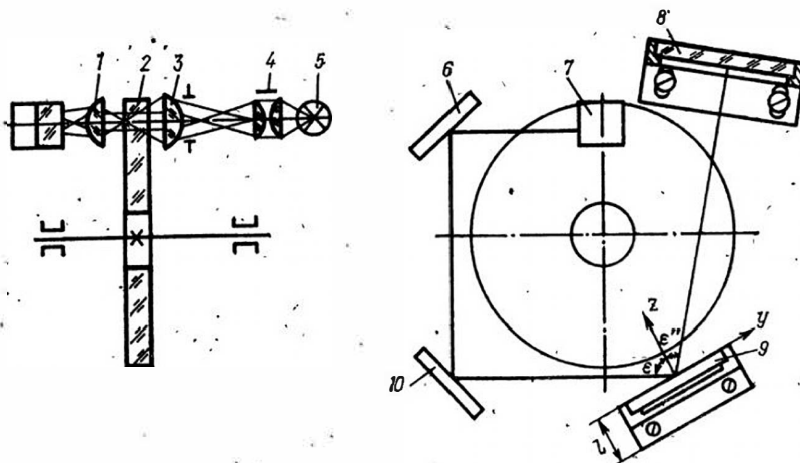


Рис. 4.29. Схема углоизмерительной проекционной головки

равную 2,2 мкм, обеспечить смещением его оправы от руки (что было заложено в конструкции первой партии автоколлиматоров) весьма трудно, поэтому оно должно осуществляться специальным регулировочным устройством, например, с помощью резьбового (с мелким шагом) соединения оправы с корпусом. Для уменьшения децентрировки оправы имеет центрирующую цилиндрическую поверхность.

Диапазон перемещения определяется дифференцированием выражения (4.6) с учетом (4.5) и составляет примерно 1 мм. Чувствительность фокусировки этого объектива определяется как  $\Delta T = 0,2/\sigma_A'^2 = 0,2/0,026^2 = 0,28$  мм. Такое перемещение можно осуществить подвижкой всего объектива от руки без применения специальных фокусирующих устройств.

**Пример.** На рис. 4.29 изображена схема углоизмерительной проекционной головки прибора для измерения мертвого хода редукторов. Здесь требуется произвести фокусировку проекционного микрообъектива 1 (МЦ 40×0,65;  $f' = 4,35$ ), работающего с апертурой  $\sigma_A = 0,4$  и увеличением  $77,1\times$  на лимб 2 и устранить разномасштабность изображения интервала ( $y = 0,7$  мм), его шкалы с нониусной шкалой, нанесенной на матовом экране 8 ( $y' = 54$  мм)

1. Определим, с какой чувствительностью нужно перемещать микрообъектив при его фокусировке. Эту величину можно найти, связав геометрическую глубину резкости изображения штрихов лимба на экране с перемещением микрообъектива.

Геометрическую глубину резкости изображения найдем из условия, что кружок рассеяния наблюдатель видит под углом  $\varphi = 1'$ :

$$T_r = 250\varphi/\alpha'_A = 250 \cdot 0,0003/0,0051 \approx 15 \text{ мм.}$$

Тогда, согласно формуле (4.16) чувствительность перемещения объектива  $\Delta x = \Delta l/\beta^2 = T_r/\beta^2 = 2,5$  мкм. Полученное значение является верхней границей чувствительности фокусировки. Нижнюю границу найдем по формуле (4.8):  $\Delta T = 0,2/0,4^2 = 1,25$  мкм. Чувствительность фокусировки микрообъектива в указанных пределах в отличие от предыдущего примера можно обеспечить только с помощью специальных устройств. Так как система подсветки 3—5, построенная по Келлеру, обеспечивает в пространстве предметов телецентрический ход лучей, то рен можно устранить только регулировкой фокусного расстояния проекционного объектива либо смещением экрана вдоль оси [32]. В связи с тем, что в качестве проекционного объектива выбран стандартный микрообъектив, устранить рен можно только смещением экрана вдоль оси.

3. Определим, с какой чувствительностью нужно перемещать экран, если допустимая разномасштабность составляет 0,1 мм. При телецентрическом ходе лучей масштаб изображения равен [32]  $y'/y = z'/f'$ , где  $z'$  — расстояние от фокальной плоскости проекционного объектива до экрана. Продифференцировав по  $y'$ , получим искомую чувствительность подвижки:  $dz' = f' dy'/y = 4,35 \cdot 0,1/0,7 = 0,6$  мм. Это смещение достигается подвижкой от руки оправы экрана вдоль боровидных пазов. Рассчитаем максимальное значение подвижки. Причинами разномасштабности являются погрешности расположения оптических элементов и погрешности фокусного расстояния объектива. Погрешность расположения не превосходит долей миллиметра. Погрешность же фокусного расстояния достигает 2—3 % его значения и приводит к существенному изменению масштаба и, следовательно, к значительным перемещениям экрана:

$$\Delta z_{\Delta f} = \pm y' \Delta f'/y = \pm \beta \Delta f' = \pm 77,1 \cdot 0,12 = \pm 9 \text{ мм.}$$

**Пример.** В винтовом окулярном микрометре (см. рис. 1.9, а) требуется одновременно резко видеть марку, нанесенную на подвижной сетке, шкалу грубого отсчета (либо индекса) и изображение объекта наблюдения, создаваемого объективом. Так как глаз аккомодируется на сетку, то глубина резкости определяется выражением (4.13) и составляет, например, для окуляра с  $\Gamma = 15\times$ , 0,05 мм. В пределах этой глубины резкости может возникнуть продольный параллакс между маркой подвижной сетки и изображением объекта, с которым она совмещается.

Таким образом, при сборке нужно обеспечить регулировку расстояния между подвижной и неподвижной сетками с чувствительностью не менее 0,05 мм и фокусировку изображения на подвижную сетку с чувствительностью, определяемой допустимым значением продольного параллакса (если допуск на него не меньше 0,05 мм). Например, для автоколлиматора с окулярным микрометром (см. рис. 2.1) в случае, если допустимое значение погрешности измерения из-за параллакса равно  $\Delta y_{\Delta p} = 0,2''$ ,  $f' = 343,6$  мм,  $t = 0,5$  мм,  $\Gamma = 15\times$ , то по формуле (4.9) с учетом автоколлимации получим  $\Delta p = 0,023$  мм.

**Пример.** В некоторых оптических приборах для компенсации расфокусировки, возникающей в процессе эксплуатации, применяют системы автофокусировки. Отдельные схемы таких устройств были рассмотрены в пп. 1.4 и 4.1.

Рассмотрим устройство коррекции расфокусировки кадра современного диапроектора. На рис. 4.30 изображена схема устройства подфокусировки изображения диапроектора, компенсирующего различие толщины диапозитивных рамок, прогиб пленки, температурные деформации корпуса прибора. Оно представляет собой съемный автономный узел, построенный по схеме двойного микроскопа Линника и содержит источник света 1, линзу 2, строящую изображение нити лампы на поверхности пленки 3, линзу 7, переносящую изображение нити в плоскость позиционно-чувствительного фотоприемника 9, теплофильтр 8. При смещении плоскости пленки от номинального положения на величину  $T$  изображение нити лампы сместится относительно равносигнальной зоны дифференциального фотодиода на величину  $y'$ :

$$y' = 2T\beta_2 \sin(\alpha/2) = T\sqrt{2}\beta_2. \quad (4.17)$$

где  $\beta_2$  — увеличение линзы 7;  $\alpha = 90^\circ$  — угол между осями двойного микроскопа. Обычно  $y_{\max} = b/2$ , где  $b$  — размер фоточувствительной площадки приемника. В результате возникает сигнал рассогласования, который через усилитель 6 управляет двигателем 5, приводящим диапозитив с помощью зубчатого редуктора и кулачка 4 в номинальное положение. Задавая возможные смещения пленки из номинального положения  $T_{\max}$ , размеры чувствительных площадок фотоприемника и размеры нити лампы  $d$ , определяют по формуле (4.17) увеличение линз 7 ( $\beta_2$ ) и 2 ( $\beta_1$ ):

$$\beta_2 = b/(2T_{\max} \sqrt{2}); \quad \beta_1 = b/(d\beta_2).$$

Характеристики основного проекционного объектива позволяют определить требуемую точность коррекции исходя из глубины его резкости. Для проекционного объектива глубину резкости определяют по формуле (4.14). Приняв для диа-

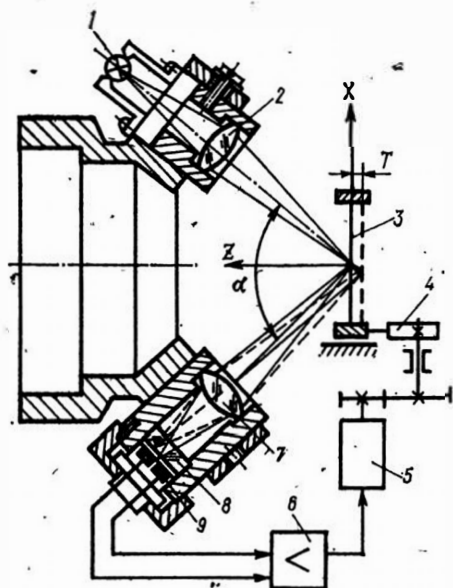


Рис. 4.30. Схема устройства подфокусировки кадра диапроектора

проектора, что минимальное расстояние от наблюдателя до экрана примерно равно расстоянию от диапроектора до экрана, т. е.  $L_{\min} \approx (p' - 2f')$ , получим  $T_{г.п} \approx f' \phi A$ , где  $A$  — относительное отверстие объектива. Для типового проекционного объектива типа «Триплет» с  $f' = 100$  мм,  $A = 1:2,8$  получим (с учетом того, что разрешаемая способность глаза для условий наблюдения диафильма  $\phi = 5-6'$ ):  $T_{г.п} = \pm 100 \cdot 5' \cdot 3 \cdot 10^{-4} \times 0,357 = \pm 54$  мкм. Это значение в свою очередь позволяет получить допуски на чувствительность и точность работы электронной части и привода.

Данная схема автофокусировки в некоторой степени чувствительна к наклону кадра вокруг оси  $Y$ , поэтому при его подвижках следует обеспечить отсутствие наклонов как вокруг оси  $Y$ , так и вокруг оси  $X$  (поворот кадра вокруг оси  $X$  не приводит к срабатыванию следящей системы, но может вызвать расфокусировку изображения на краях). Допустимое значение наклонов  $\Delta\gamma$  вокруг произвольной оси можно оценить соотношением  $\Delta\gamma \leq < 2T_{г.п}/l$ , где  $l$  — размер кадра по диагонали.

Юстировка узла подфокусировки производится в следующем порядке. Вначале настраивают на резкость проекционный объектив по эталонному кадру. Затем осевым смещением узла с линзой 2 добиваются проекции нити лампы на плоскость фотопленки. Перемещением узла с линзой 7 осуществляют перенос изображения в плоскость чувствительных площадок фотоприемника. Подвижками и разворотом фотоприемника (при необходимости сдвигами лампы) добиваются отсутствия сигнала рассогласования, что будет при параллельном и симметричном расположении изображения нити лампы относительно границы между фоточувствительными площадками.

#### 4.4. ПЕРЕСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПЛАВКИ СТЕКОЛ И КОМПЛЕКТАЦИЯ ЛИНЗ

Пересчет оптических систем на плавки стекол и комплектацию линз по толщинам широко применяют для повышения качества изображения, создаваемого системой, и расширения допусков на

оптические константы стекол, толщину линз и погрешности радиусов кривизны эталонных стекол, используемых для контроля.

Этот способ компенсации основан на том, что упомянутые погрешности являются случайными только на этапе расчета оптической системы. Когда же будет известно конкретное значение оптических констант ( $n_e$ ,  $n_f$  —  $n_c$ ) заготовок стекол, будут изготовлены линзы и определен набор эталонных стекол, эти погрешности перейдут в разряд систематических.

Влияние систематических погрешностей может быть существенно ослаблено следующим образом. Перед запуском оптических элементов в производство расчетчик на основании результатов обмера радиусов эталонных стекол и данных о  $n_e$  и  $n_f$  —  $n_c$  паспорта завода оптического стекла на стекла конкретных плавов либо на основании лабораторных измерений этих констант производит перерасчет (коррекцию) оптической системы. Пересчет производится на ЭВМ или с помощью таблицы влияния указанных параметров на изменения фокусного и вершинного фокусного расстояний, хроматизма положения и увеличения, сферической аберрации, астигматизма, дисторсии и других аберраций.

Результатом пересчета являются изменения воздушных промежутков и толщин некоторых линз, обеспечивающие требуемое качество системы. В некоторых случаях изменяют радиусы кривизны линз (для коррекции хроматических аберраций изменением радиусов склейки), что является нежелательным, так как может повлечь изменение радиусов шлифовальников и эталонных стекол. Указанный пересчет системы выполняют независимо от ее серийности.

В процессе изготовления линз возникают погрешности их толщин, которые могут ухудшить качество системы. Для компенсации их влияния линзы комплектуют по толщине так, чтобы отклонения толщин одних компенсировали отклонения других. Этот метод применяют в основном в крупносерийном и массовом производстве, где можно подобрать комплект линз с нужной толщиной, так как погрешность толщин отдельных линз распределяется по закону Гаусса с небольшим смещением центра группирования в плюс от номинала из-за стремления оптика иметь исправимые возможные брак и дефекты (царапины, следы пузырей, отступление от пробного стекла). Комплектация линз производится перед склейкой компонентов и сборкой системы.

Толщины склеиваемых линз подбирают таким образом, чтобы толщина склеиваемого блока была номинальной. Особенно тщательно, с обязательным учетом толщины слоя клея, следует комплектовать системы, чувствительные к погрешности толщин (например, линзы фотограмметрических объективов).

Перед сборкой системы линзы на основе таблиц влияния их толщин на качество подбираются в комплект так, чтобы погрешность изготовления толщин одних компенсировала влияние погрешностей других. Подобранный в оптическом цехе комплект линз маркируют и отправляют в сборочный цех. В случае единичного и мелкосерийного производства комплектовать линзы по толщинам перед склей-

кой и сборкой не представляется возможным, поэтому компенсацию влияния погрешностей их толщин производят изменением воздушных промежутков. Для этого измеряют погрешности толщин комплекта всех линз, входящих в систему, и по таблицам влияния (либо пересчетом на ЭВМ) определяют необходимое изменение некоторых воздушных промежутков. Комплект оптики, для которого сделан пересчет воздушных промежутков, маркируют, снабжают таблицей толщин и откорректированных воздушных промежутков, которые выдерживаются при сборке.

Так как допуски на первичные погрешности оптической системы назначаются перераспределением суммарного допуска на ее качество между первичными погрешностями, то применение метода пересчета на плавки стекол и комплектация линз по толщинам позволяет расширить допуски не только на те погрешности, которые компенсируются при этом методе, но и на другие (например, радиусов кривизны поверхностей линз, выдерживания воздушных промежутков, центрировки). Более подробно метод пересчета на плавки изложен в работе [21].

#### 4.5. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗЕРКАЛЬНО-ПРИЗМЕННЫХ СИСТЕМ

Зеркально-призменные системы (ЗПС) требуют весьма строгой ориентировки относительно других элементов оптической схемы. Погрешности расположения неподвижных ЗПС в сходящемся ходе лучей приводят к децентрировкам, наклону и перекосу изображения, срезанию поля зрения и зрачков, расфокусировке. Погрешности расположения неподвижных ЗПС в параллельном ходе лучей оказывают меньшее влияние на качество изображения, однако часто требуется их строгая угловая установка относительно некоторых баз прибора.

Погрешность расположения подвижных ЗПС приводит к погрешности функционирования прибора, ухудшению качества изображения и другим дефектам. Рассмотрим влияние погрешностей расположения простейших ЗПС, являющихся эквивалентами большого ряда более сложных ЗПС, на некоторые характеристики качества прибора.

**ЗПС в сходящемся ходе лучей.** Пусть зеркало 1 установлено в сходящемся ходе лучей между объективом 2 и матовым экраном 3, на котором строится изображение (рис. 4.31). Свяжем с номинальным положением зеркала неподвижную координатную систему  $x, y, z$ , а с экраном —  $x_0, y_0, z_0$ .

При установке зеркала возможны его линейные и угловые смещения (погрешности) относительно номинального положения. Небольшие смещения зеркала вдоль осей  $x$  и  $y$  недействительны (так как световой диаметр зеркала обычно выполняется с запасом для устранения срезания светового пучка). Смещение зеркала из номинального положения вдоль оси  $z$  на величину  $\Delta z$  вызывает параллельный сдвиг отраженного пучка лучей, т. е. сдвиг изображения на экране

$(\Delta y_z)$ , расфокусировку  $(\Delta z_z)$ , погрешность размера изображения  $(\delta y')$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_z &= 2 \sin \varepsilon \Delta z; \\ \Delta z_z &= 2 \cos \varepsilon \Delta z; \\ \delta y' &= (4 \cos \varepsilon y'/L) \Delta z, \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

где  $\varepsilon$  — угол падения осевого луча на зеркало;  $y'$  — половина размера изображения на экране;  $L$  — расстояние от плоскости выходного зрачка объектива до экрана.

Поворот зеркала вокруг оси  $z$  неопасен. При повороте зеркала вокруг оси  $x$  на угол  $\Delta \varphi_x$  происходят следующие явления [33]:

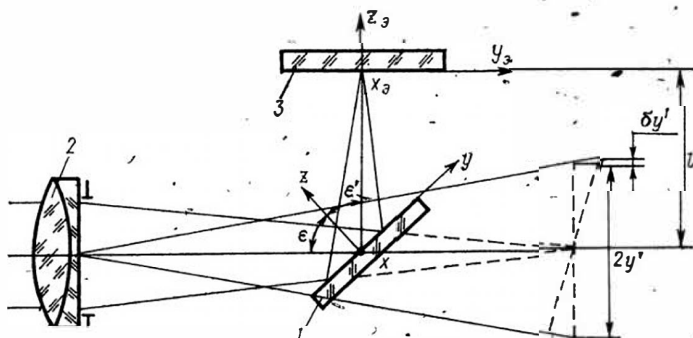


Рис. 4.31. Плоское зеркало в сходящемся пучке лучей

1) сдвиг изображения по оси  $y_z$  —  $\Delta y_z = 2l \Delta \varphi_x$ , где  $l$  — расстояние от точки падения осевого луча на зеркало до экрана;

2) наклон плоскости изображения на величину  $\Delta \varphi_z = 2\Delta \varphi_x$  (разворот относительно оси  $x_z$ );

3) погрешность размера (масштаба) изображения по оси  $y$  за счет наклона плоскости изображения —  $\delta y' \approx 2y' \Delta \varphi_x / L$ ;

4) расфокусировка на оси  $(\Delta z_{z, o})$  и на краях  $(\Delta z_{z, k})$  изображения —  $\Delta z_{z, o} \approx l \Delta \varphi_x^2$ ;  $\Delta z_{z, k} \approx 2y' \Delta \varphi_x \pm l \Delta \varphi_x^2$ . Знак зависит от направления поворота зеркала.

При повороте зеркала вокруг оси  $y$  на угол  $\Delta \varphi_y$  происходят следующие явления [33]:

1) сдвиг изображения по оси  $x_z$  —  $\Delta x_z = 2l \cos \varepsilon \Delta \varphi_y$ ;

2) разворот изображения вокруг оси  $z_z$  —

$$\Delta \varphi_{z_z} = 2 \sin \varepsilon \Delta \varphi_y; \quad (4.19)$$

3) наклон изображения относительно оси  $y_z$  —  $\Delta \varphi_{y_z} = 2 \cos \varepsilon \Delta \varphi_y$ ;

4) погрешность масштаба изображения по оси  $x_z$  —  $\delta y'_x = (2y'_x \cos \varepsilon / L) \Delta \varphi_y$ , где  $y'_x$  — половина размера изображения на экране по оси  $x_z$ ;

5) расфокусировка на оси  $(\Delta z'_{z, o})$  и краях  $\Delta z'_{z, k}$  —

$$\Delta z'_{z, o} = l \cos \varepsilon \Delta \varphi_y^2; \quad \Delta z'_{z, k} = 2y'_x \cos \varepsilon \Delta \varphi_y \pm l \cos \varepsilon \Delta \varphi_y^2. \quad (4.20)$$

Если вместо зеркала перед экраном будет установлена призма с одним отражением (эквивалентная плоскому зеркалу и плоскопараллельной пластине), то тогда ее поворот вокруг оси  $x$  приведет к наклонной развертке призмы в плоскопараллельную преломляющую пластину, вносящую приращение хроматизма ( $\delta q_{F-C}$ ), астигматизма изображения ( $\delta a$ ) и других aberrаций [37]:

$$\delta q_{F-C} \approx (1/n_C - 1/n_F) d \Delta \varphi_x; \quad \delta a \approx [2(n^2 - 1)d\omega/n^3] \Delta \varphi_x,$$

где  $n$  — показатель преломления стекла для линий  $e$ ,  $F$ ,  $C$ ;  $d$  — толщина развертки призмы;  $\omega$  — угол наклона главного луча.

К изменению aberrаций приводит поворот призмы также вокруг осей  $y$  и  $z$ .

Рассмотрим случай, когда между объективом и экраном установлено угловое зеркало (рис. 4.32). Известно, что для углового

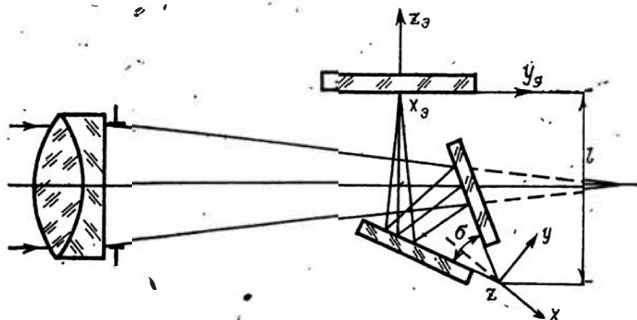


Рис. 4.32. Угловое зеркало в сходящемся пучке лучей

зеркала «недейственными» являются смещения вдоль ребра (вдоль оси  $z$ ) и поворот вокруг него (вокруг оси  $z$ ). Смещение зеркала параллельно оси  $x$ , направленной по биссектрисе угла между зеркалами  $\sigma$ , приводит только к расфокусировке и погрешности размера изображения:

$$\Delta z_g = 2 \sin \sigma \Delta x; \quad \delta y' = (4 \sin \sigma y'/L) \Delta x.$$

Смещение углового зеркала перпендикулярно к его ребру по осей  $y$  (параллельно биссектрисе угла между падающим и выходящим лучами) приводит только к сдвигу изображения (децентрировка второго рода) вдоль оси  $y_g$

$$\Delta y_g = 2 \sin \sigma \Delta y.$$

Эти свойства углового зеркала при его смещении вдоль указанных направлений широко используют при юстировке для сдвига и фокусировки изображения, центрировки элементов системы.

Поворот зеркала вокруг оси  $x$  приводит к развороту изображения вокруг оси  $z_g$ :

$$\Delta \varphi_{z_g} = 2 \sin \sigma \Delta \varphi_x,$$



Наиболее опасным является поворот углового зеркала вокруг оси  $y$ , вызывающий сдвиг и наклон изображения, расфокусировку на оси и краях, разномасштабность изображения [37]:

$$\Delta x_z = 2l \sin \sigma \Delta \varphi_y; \quad \Delta \varphi_{y_z} = 2 \sin \sigma \Delta \varphi_y;$$

$$\Delta z_{z.o} = l \sin \sigma \Delta \varphi_y^2; \quad \Delta z_{z.k} = 2 \sin \sigma y'_x \Delta \varphi_y \pm l \sin \sigma \Delta \varphi_y^2;$$

$$dy'_x = (2y_x^2 \sin \sigma / L) \Delta \varphi_y,$$

где  $l$  — расстояние от ребра углового зеркала до экрана;  $L$  — расстояние от выходного зрачка объектива до экрана;  $y'_x$  — половина изображения на экране по оси  $x$ .

При установке вместо углового зеркала призмы с двумя отражениями (например, БП-90°) ее развороты вокруг осей  $x$ ,  $y$ , а также  $z$  вызывают, кроме перечисленных дефектов, приращение aberrаций, так как ее развертка в виде толстой плоскопараллельной пластинки будет наклонена к оптической оси.

Рассмотрим примеры расчета компенсаторов погрешностей расположения ЗПС. В углоизмерительной головке прибора ПМХ (см. рис. 4.29) из-за технологических погрешностей, приводящих к наклонам зеркал, 6, 9, 10 и призмы 7 вокруг оси  $y$  возникает разворот изображения штрихов лимба относительно штрихов нониуса экрана. Этот разворот компенсируется поворотом зеркала 9 вокруг оси  $y$ . Рассчитаем пороговую чувствительность поворота зеркала исходя из условия, чтобы не было заметно на глаз разворота изображения.

Определим, какой угол разворота изображения штриха относительно штриха нониуса не заметен на глаз. При этом будем исходить из того, что разворот ( $\Delta \gamma$ ) будет заметен тогда, когда разность ( $d$ ) между расстоянием по верхним ( $c$ ) и нижним ( $a$ ) концам штрихов (рис. 4.33) будет равна в линейной мере разрешающей способности глаза:  $d = 250 \cdot \psi = 250 \cdot 1' \cdot 0,0003 = 0,075$  мм, следовательно,  $\Delta \varphi_z = \Delta \gamma = d/B = 0,075/5 = 50'$ .

По формуле (4.19) определим искомую чувствительность поворота зеркала:  $\Delta \varphi_y = \Delta \varphi_z / (2 \sin \epsilon) = 50' / (2 \sin 50^\circ) \approx 32'$ . Такая чувствительность может быть достигнута довольно легко (например, с помощью прокладок, устанавливаемых под оправу зеркала). Толщина прокладки будет определяться базой  $l$  оправы  $t = l \Delta \varphi_y = 0,2$  мм.

Еще один пример связан с определением необходимости компенсации возможного поворота светоделительного зеркала 9 вокруг оси  $y$  автоколлиматора из-за технологических погрешностей (см. рис. 4.28). При таком повороте без учета дефектов второго порядка малости опасными являются расфокусировка на краях, сдвиг и разворот изображения. Допуская расфокусировку на краях не более глубины резкости телеобъектива либо даже не более чувствительности продольных наводок, равную 0,28 мм [см. формулу (4.8)], получаем из (4.20)  $\Delta \varphi_y \approx \Delta z_z / (2y \cos \epsilon) = 0,28 / (2 \cdot 2,5 \cos 45^\circ) = 4,5^\circ$ . Такой допуск легко выдержать технологически.

Допустимый сдвиг изображения, определяемый геометрическими размерами автоколлимационной марки и биштриха экрана, равен  $\pm 1$  мм. Отсюда  $\Delta \varphi_y = \Delta x_z / (2l \cos \epsilon) = 1 / (2 \cdot 2,5 \cos 45^\circ) = 1,6^\circ$ . Этот допуск также выдерживается технологически.

Незаметный на глаз разворот изображения автоколлимационного штриха относительно биштриха экрана составляет (при размере меньшего из штрихов 5 мм)  $50'$ , следовательно, допустимый наклон зеркал из выражения (4.19) будет равен  $\Delta \varphi_y = \Delta \varphi_z / (2 \sin \epsilon_{\max}) = 50' / (2 \sin 55^\circ) = 30'$ . Этот допуск наиболее жесткий из рассмотренных, но и он может быть выдержан технологически без применения

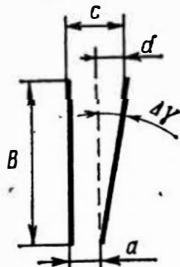


Рис. 4.33. Определение заметного на глаз угла разворота изображения штриха

компенсатора наклона. В том случае, если проецируемая марка при юстировке автоколлиматора может поворачиваться для установки ее изображения параллельно биштриху экрана, то при этом компенсируется разворот изображения из-за наклона светоделительного зеркала. Допуск на этот наклон будет определяться разворотом изображения из-за изменения угла падения осевого луча на зеркало:  $\Delta\varphi_y = \Delta\varphi_z / [2 (\sin \varepsilon_{\max} - \sin \varepsilon_{\min})] = 50' [2 (\sin 55^\circ - \sin 35^\circ)] = 1,7^\circ$ . Таким образом, наличия компенсатора поворота зеркала вокруг оси  $y$  не требуется.

На рис. 4.34 изображено зеркало 1, расположенное в сходящемся пучке лучей между положительным 2 и отрицательным 3 компонентами телеобъектива, строящего изображение на экране 4. В этой системе допуски на погрешности положения зеркала вдоль оси  $Z$

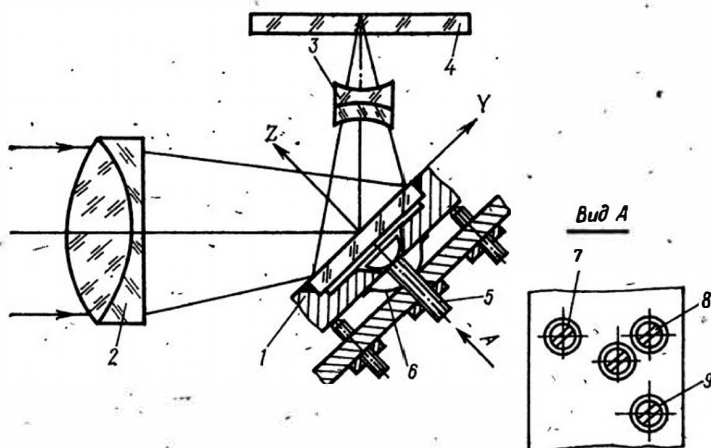


Рис. 4.34. Плоское зеркало, расположенное между компонентами телеобъектива

и углы его поворота вокруг осей  $X$  и  $Y$  определяются допустимыми значениями хроматизма или комы, возникающих из-за децентрировок 1-го и 2-го рода компонентов телеобъектива, обусловленных погрешностями положения зеркала.

Если, например, задать волновой допуск на хроматизм  $\Delta_{FC} = 0,1$  мкм, а допустимое значение комы, равным радиусу первого дифракционного кольца, то по формулам для  $\Delta C''$  и  $\Delta\gamma$  получаем допустимое смещение зеркала вдоль оси  $Z$ :  $\Delta z \approx 10$  мкм, а наклон относительно осей  $X$  и  $Y$ :  $\Delta\varphi_{x,y} \approx 2'$ . Такие допуски выдержать технологически трудно, поэтому с учетом возможной необходимости компенсации децентрировок компонентов, возникающих при креплении в оправе, целесообразно предусмотреть результирующую обработку оправы зеркала либо его соответствующие подвижки. Результирующая обработка базовых поверхностей оправы производится после сборки узла зеркала на токарно-арматурном (либо фрезерном) станке с помощью контрольно-юстировочного приспособления, содержащего автоколлимационную трубку. Приспособление позволяет ориентировать зеркало перпендикулярно к шпинделю станка. Угловая погрешность отражающей поверхности зеркала

относительно базы после результирующей обработки обычно не превосходит  $1'$ .

Конструктивные подвижки зеркала с высокой чувствительностью осуществляются проектированием специальных оправ. Одно из возможных решений изображено на рис. 4.34. Здесь смещение зеркала вдоль оси  $Z$  осуществляется винтом 5 и пружиной 6. Повороты вокруг осей  $X$  и  $Y$  — винтами 7 и 9. Для обеспечения большей независимости юстировок центр сферы винта 5 должен совпадать с отражающей поверхностью зеркала, а винты 7—9 — образовывать прямой угол.

**Подвижное зеркало в параллельном ходе лучей.** Рассмотрим влияние погрешностей положения головного качающегося зеркала пе-

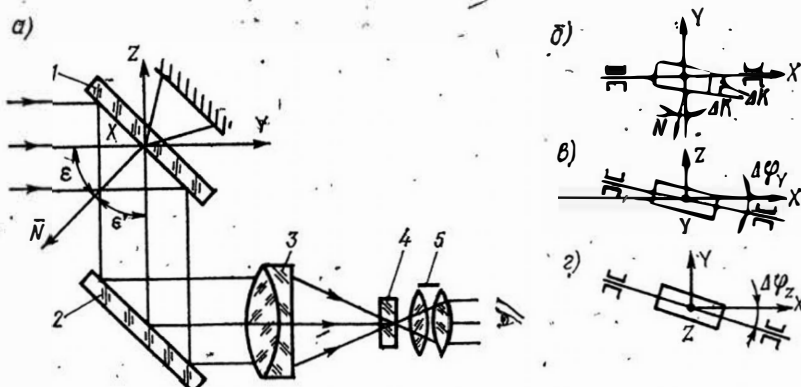


Рис. 4.35. Погрешности головного зеркала перископического визира: а — схема визира; б, в, г — схемы погрешностей

рископического визира на точность визирования и измерения (или ввода) горизонтальных и вертикальных углов. Упрощенная схема прибора представлена на рис. 4.35, а. Здесь: 1 — качающееся в пределах от  $-5^\circ$  до  $+20^\circ$  головное зеркало, 2 — неподвижное зеркало, 3 — объектив, 4 — сетка, 5 — окуляр. На точность визирования и измерения горизонтальных и вертикальных углов по сетке визира влияют следующие погрешности положения головного зеркала:

- 1) коллимационная ошибка  $\Delta K$  — неперпендикулярность нормали, отражающей поверхности зеркала к оси качания (рис. 4.35, б);
- 2) наклон  $\Delta\varphi_Y$  оси качания (наклон оси цапф) относительно горизонтальной плоскости (поворот вокруг оси  $Y$ ) (рис. 4.35, в);
- 3) разворот  $\Delta\varphi_Z$  оси качания вокруг вертикальной оси  $Z$  (будем считать, что последующая система отъюстирована так, что визирная ось параллельна оси  $Z$  (рис. 4.35, г).

Коллимационная ошибка приводит к тому, что при качании зеркала его нормаль описывает не плоскость начального меридиана, а поверхность конуса. Траектория следа нормали на сферу будет отстоять от начального меридиана на величину  $\Delta K$ , а след визирной линии будет проходить через зенит и отстоять от надира на величину  $2\Delta K$ .

Для определения погрешности визирования и измерения горизонтальных и вертикальных углов найдем направление орта отраженного луча в случае, когда зеркало имеет коллимационную погрешность

$$\bar{A}' = M' \bar{A} = \begin{pmatrix} 1 - 2 \sin^2 \varepsilon \cos^2 \Delta K & 2 \sin \varepsilon \cos \Delta K \sin \Delta K \\ 2 \sin \varepsilon \cos \Delta K \sin \Delta K & 1 - 2 \sin^2 \Delta K \\ 2 \sin \varepsilon \cos^2 \Delta K \cos \varepsilon & 2 \sin \Delta K \cos \Delta K \cos \varepsilon \\ 2 \sin \varepsilon \cos^2 \Delta K \cos \varepsilon & 2 \cos \varepsilon \cos \Delta K \sin \Delta K \\ 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta K & 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin 2\varepsilon \cos^2 \Delta K \\ 2 \cos \varepsilon \cos \Delta K \sin \Delta K \\ 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta K \end{pmatrix}, \quad (4.21)$$

где  $\bar{A}'$  — орт отраженного луча;  $\bar{A}$  — орт падающего луча;  $M'$  — матрица действия плоского зеркала;  $\varepsilon$  — угол падения луча на зеркало.

Из выражения (4.21) следует, что коллимационная погрешность вызывает ошибку визирования и измерения горизонтальных углов ( $\Delta \delta_{\Delta K}$ ) первого порядка, а вертикальных  $\Delta i_{\Delta K}$  — второго порядка малости:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta_{\Delta K} &= 2 \cos \varepsilon \cos \Delta K \sin \Delta K \approx 2 \cos \varepsilon \Delta K; \\ \Delta i_{\Delta K} &= 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta K - 1 + 2 \cos^2 \varepsilon = \\ &= 2 \cos^2 \varepsilon (1 - \cos^2 \Delta K) \approx 2 \cos^2 \varepsilon \Delta K^2 = \Delta \delta_{\Delta K}^2 / 2. \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

Наклон оси качания приводит к тому, что нормаль зеркала описывает дугу большого круга, наклонную к начальному меридиану. Траектория следа визирной оси также проходит через зенит и отстоит от надира на  $2\Delta\varphi_Y$ . Найдем направление орта отраженного луча при наличии этой погрешности

$$\bar{A}' = M' \bar{A} = \begin{pmatrix} 1 - 2 \sin^2 \varepsilon & 2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon \sin \Delta\varphi_Y \\ 2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon \sin \Delta\varphi_Y & 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \sin^2 \Delta\varphi_Y \\ 2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon \cos \Delta\varphi_Y & 2 \cos^2 \varepsilon \sin \Delta\varphi_Y \cos \Delta\varphi_Y \\ 2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon \cos \Delta\varphi_Y & 2 \cos^2 \varepsilon \cos \Delta\varphi_Y \sin \Delta\varphi_Y \\ 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta\varphi_Y & 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta\varphi_Y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin 2\varepsilon \cos \Delta\varphi_Y \\ \cos^2 \varepsilon \sin 2\Delta\varphi_Y \\ 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \cos^2 \Delta\varphi_Y \end{pmatrix}.$$

Следовательно, наклон оси цапф также приводит к погрешности первого порядка при визировании и измерении горизонтальных углов и второго порядка — вертикальных углов:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta_{\Delta\varphi_Y} &= \cos^2 \varepsilon \sin 2\Delta\varphi_Y \approx 2 \cos^2 \varepsilon \Delta\varphi_Y; \\ \Delta i_{\Delta\varphi_Y} &= 2 \cos^2 \varepsilon \Delta\varphi_Y^2. \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

При развороте оси качания вокруг вертикальной оси нормаль зеркала и визирная линия выходят из плоскости начального меридиана (нулевой плоскости визира) и описывают дугу большого круга, отстоящую от него в плоскости горизонта на  $\Delta\varphi_Z$ . Для нахождения ошибок визирования и измерения произвольного значения угла

места определим направление орта отраженного луча при наличии этой погрешности:

$$\bar{A}' = M' \bar{A} = \begin{pmatrix} 1 - 2 \sin^2 \varepsilon \cos^2 \Delta \varphi_Z & 2 \sin^2 \varepsilon \cos \Delta \varphi_Z \sin \Delta \varphi_Z \\ 2 \sin^2 \varepsilon \cos \Delta \varphi_Z \sin \Delta \varphi_Z & 1 - 2 \sin^2 \varepsilon \sin^2 \Delta \varphi_Z \\ 2 \sin \varepsilon \cos \Delta \varphi_Z \cos \varepsilon & 2 \sin \varepsilon \sin \Delta \varphi_Z \cos \varepsilon \\ 2 \sin \varepsilon \cos \Delta \varphi_Z \cos \varepsilon & 2 \sin \varepsilon \cos \varepsilon \sin \Delta \varphi_Z \\ 1 - 2 \cos^2 \varepsilon & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin 2\varepsilon \cos \Delta \varphi_Z \\ \sin 2\varepsilon \sin \Delta \varphi_Z \\ 1 - 2 \cos^2 \varepsilon \end{pmatrix}.$$

Погрешность визирования и измерения горизонтальных и вертикальных углов, таким образом, будет равна:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \delta_{\Delta \varphi_Z} &= \sin 2\varepsilon \sin \Delta \varphi_Z \approx \sin 2\varepsilon \Delta \varphi_Z; \\ \Delta i_{\Delta \varphi_Z} &= (1 - 2 \cos^2 \varepsilon) - (1 - 2 \cos^2 \varepsilon) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Перечисленные первичные погрешности положения качающегося зеркала обычно устраняют при юстировке данного узла. Для этого конструкция крепления зеркала должна обеспечить возможность компенсации коллимационной погрешности, а конструкция узла оси качания — ее наклон и разворот.

Анализ формул (4.22)—(4.24) показывает, что влияние данных погрешностей может быть частично взаимно скомпенсировано, причем недокомпенсация (особенно с учетом того, что отрицательные углы места невелики) может оказаться незначительной. Следовательно, отпадает необходимость компенсировать каждую первичную погрешность, достаточно оставить только один компенсатор, позволяющий уменьшить влияние других погрешностей. Использование этого в некоторых случаях позволяет существенно упростить конструкцию узла зеркала и облегчить его юстировку. На рис. 4.36 изображена конструкция такого узла. Здесь 3 — головное зеркало, приводимое в движение рычагом 6; 2, 4 — цапфы оси качания; 1 — корпус узла. Так как имеется возможность компенсации коллимационной погрешности зеркала, то оно крепится к цапфам приклеиванием полиуретановым клеем ПУ-2 РТМ 3-60—70. Соосность цапф 4 и 2 выдерживается при этом технологически путем задания соответствующих допусков на зеркало и цапфы, а также с помощью специального приспособления для приклеивания. Компенсация наклона оси цапф из-за их непараллельности основанию корпуса специальным устройством здесь также может быть не предусмотрена.

Компенсация коллимационной погрешности и наклона оси цапф осуществляется разворотом корпуса узла, что достигается смещением фиксатора 5. Полная компенсация может быть осуществлена при этом только для одного значения угла места, например, в горизонтальной плоскости ( $i = 0$ ).

Необходимое значение угла поворота корпуса ( $\Delta \varphi_Z$ ) определяется при этом из уравнения  $2 \Delta K \cos 45^\circ + 2 \cos^2 45^\circ \Delta \varphi_Y + \sin 90^\circ \Delta \varphi_Z = 0$ , откуда  $\Delta \varphi_Z = -(\sqrt{2} \Delta K + \Delta \varphi_Y)$ . Наибольшее значение недокомпенсации ( $\Delta \delta_{\text{нр}}$ ) будет соответствовать при этом

максимальному углу места ( $i = 40^\circ$ ):  $\Delta\delta_{\text{нк max}} = 2\Delta K \cos 65^\circ + 2 \cos^2 65^\circ \Delta\varphi_{\text{г}} - (\sqrt{2}\Delta K + \Delta\varphi_{\text{г}}) \sin 130^\circ$ . Например, для легко выполняемых технологически допусков на  $\Delta K$  и  $\Delta\varphi_{\text{г}}$  в  $10'$  и неблагоприятном (одинаковом) сочетании их знаков значение недокомпенсации равно  $\Delta\delta_{\text{нк max}} \approx 6'$ . Если такое значение недокомпенсации погрешности недопустимо, то следует ужесточить допуски на  $\Delta K$ ,

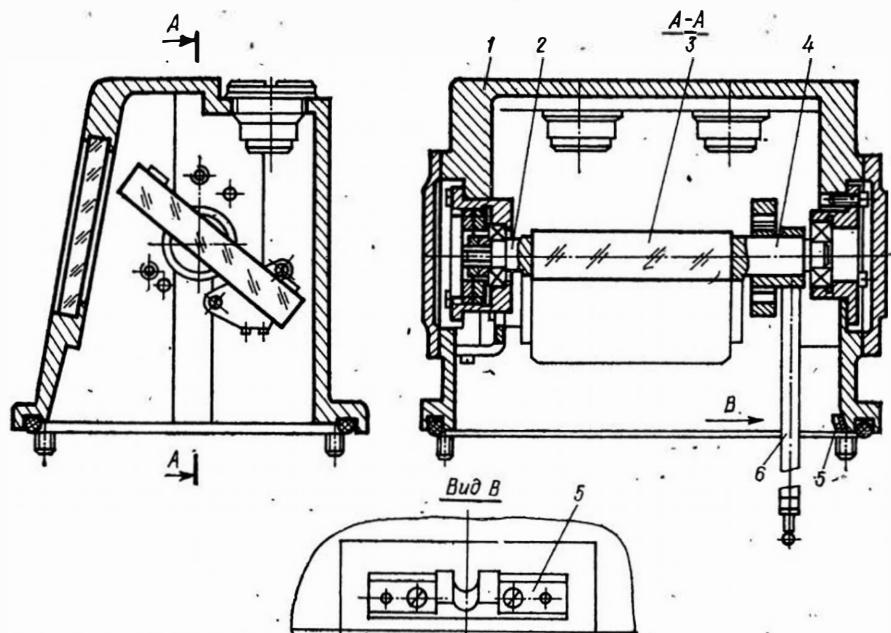


Рис. 4.36. Головное зеркало визира

$\Delta\varphi_{\text{г}}$  (или допуск на одну из них), либо ввести второй компенсатор. В данной конструкции можно предусмотреть, например, регулировку наклона оси цапф путем смещения стаканов подшипников относительно корпуса в пределах зазора в посадке.

#### 4.6. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЛИМБОВ

Лимбы являются мерой угла углоизмерительных приборов гониометрического типа. От точности изготовления и сборки лимбов в существенной степени зависит точность работы этих приборов. Различают следующие погрешности лимбов: погрешность деления, установочный эксцентриситет, разноширинность штрихов, относительную погрешность светопропускания, погрешность формы центрировочной окружности, торцевое биение. Основными из них являются установочный эксцентриситет и погрешность деления. В прецизионных углоизмерительных приборах производят компенсацию этих погрешностей.

**Компенсация эксцентриситета лимба.** Эксцентриситет ( $\Delta e$ ) — несовпадение оси вращения  $O_1$  с центром делений  $O_2$  — приводит

к появлению погрешности отсчета по лимбу, т. е. к погрешности его положения (рис. 4.37, а):

$$\Delta\varphi_0 = -\sin \theta \Delta e/R,$$

где  $\theta$  — направление эксцентриситета;  $R$  — рабочий радиус лимба. Погрешность измерения угла поворота лимба определим как

$$\Delta\varphi_{\Delta e} = -(\sin \theta_T - \sin \theta_H) \Delta e/R = [\sin \theta_H - \sin(\varphi + \theta_H)] \Delta e/R,$$

где  $\theta_H$ ,  $\theta_T$  — начальное и текущее направления эксцентриситета соответственно;  $\varphi$  — угол поворота лимба от начального до текущего положения. График этой погрешности зависит от начальной фазы вектора эксцентриситета и имеет период, равный  $2\pi$

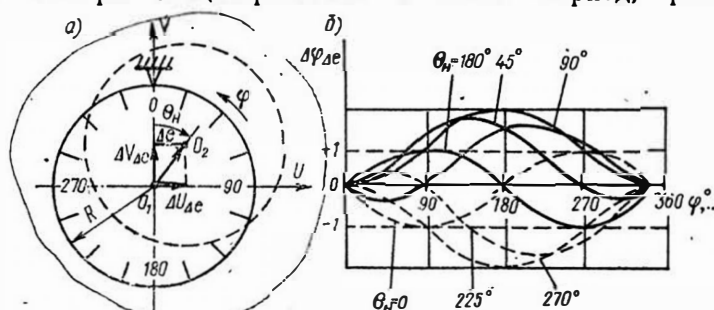


Рис. 4.37. Погрешность измерения углов из-за эксцентриситета лимба: а — схема образования погрешности отсчета; б — графики погрешности в зависимости от начальной фазы вектора эксцентриситета

(рис. 4.37, б). Как видно из графиков, только в частном случае, когда  $\theta_H = 0$  или  $\theta_H = 180^\circ$ , погрешность представляет собой синусоиду. В остальных случаях графики погрешности заключены между функциями  $(\cos \varphi - 1)$  и  $(1 - \cos \varphi)$ . Это необходимо учитывать при выявлении гармонической составляющей погрешности от эксцентриситета лимба по экспериментальному графику суммарной погрешности устройства и при ее коррекции.

Различают следующие способы компенсации влияния эксцентриситета:

- 1) центрирование лимба;
- 2) работа на диаметрально противоположных участках лимба (двойной отсчет);
- 3) смещение изображения.

Центрирование лимба производится по его геометрическим элементам или путем измерения составляющей погрешности, обусловленной эксцентриситетом. Центрирование по геометрическим элементам осуществляется обычно по центрировочной окружности, которая наносится на лимб при его делении. Иногда центрирование производят по специальным меткам или концам рабочих штрихов. Для устранения эксцентриситета лимб должен иметь возможность перемещаться (перпендикулярно к оси) относительно оправы или вместе с оправой относительно оси вращения. При центрировке

ось с лимбом вращают в центрах, на призме, либо в штатных подшипниках, наблюдая в микроскоп за биением изображения центрировочной окружности (или концов штрихов) относительно биштриха (штриха) сетки микроскопа (рис. 4.38).

Биение устраняется легким постукиванием по лимбу 1 при незатянутых окончательно крепящих винтах 4 либо сдвигом его оправы 3

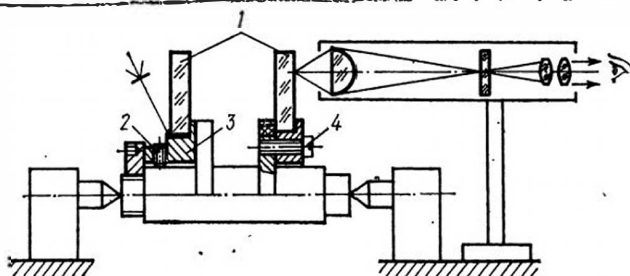


Рис. 4.38. Схема центрирования лимба по центрировочной окружности

центрировочными винтами 2. После устранения эксцентриситета лимб закрепляют окончательно, фиксируя при необходимости его положение герметиком или глетоглицериновым цементом.

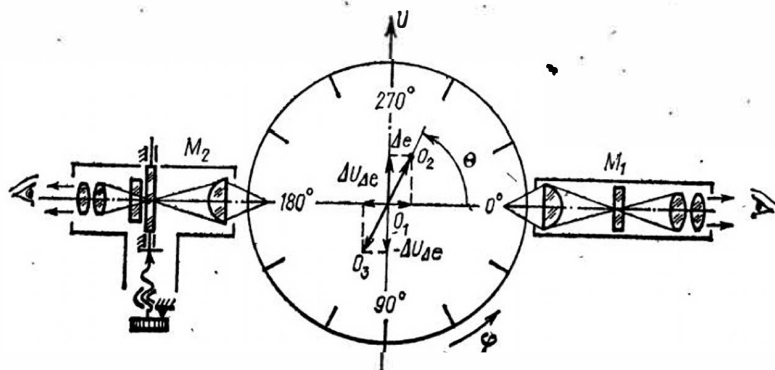


Рис. 4.39. Схема центрирования лимба по четырем штрихам с помощью двух микроскопов

Остаточная погрешность центрировки при таком методе обусловлена некруглостью центрировочной риски, погрешностью совмещения ее изображения с маркой сетки микроскопа (из-за параллакса, ограниченной остроты зрения оператора и ограниченной чувствительности смещения лимба), влиянием погрешности опор вращения оси. Обычно погрешность центрирования составляет 2—3 мкм, что может привести к погрешности измерения угла по лимбу диаметром 100 мм до 10—15".

Более высокую точность центрирования можно получить при центрировании лимба по четырем диаметрально противоположным штрихам с помощью двух микроскопов (рис. 4.39). Вращением лимба



совмещают изображение одного из штрихов с биштрихом сетки микроскопа  $M_1$ , а на противоположный штрих наводят микроскоп  $M_2$ . Микроскоп  $M_2$  для удобства работы снабжается окуляр-микрометром. Затем, повернув лимб на  $180^\circ$ , совмещают с биштрихом сетки микроскопа  $M_1$  изображение противоположного штриха. Тогда, как видно из рисунка, положение нулевого штриха относительно микроскопа  $M_2$  будет отстоять на удвоенную величину проекции вектора эксцентриситета на ось  $U$ . Сдвинув лимб вдоль этой оси на половину измеренной величины, производят частичную компен-

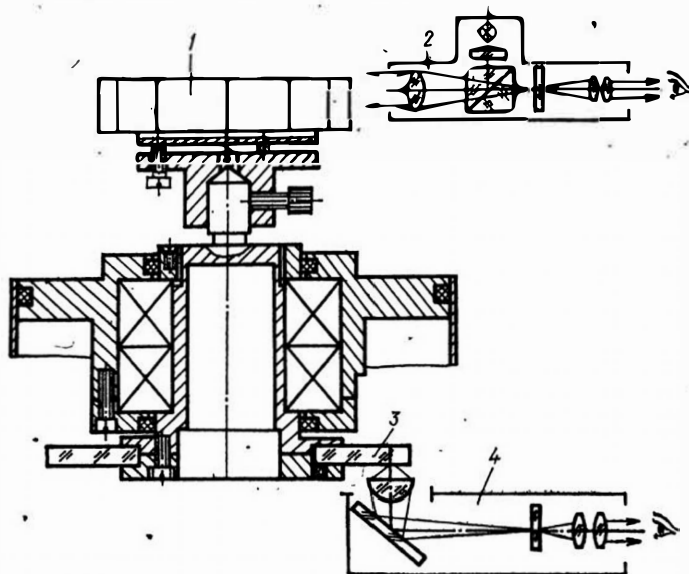


Рис. 4.40. Схема центрирования лимба по измеренной погрешности угла поворота

сацию эксцентриситета. Окончательную компенсацию производят выполнением подобных операций для пары штрихов, расположенных под углом  $90^\circ$  к первым двум штрихам.

Так как при этом сдвиг лимба может производиться не строго параллельно оси  $U$  и отличаться от расчетного, то эти операции при необходимости повторяют. При таком методе центрирования частично компенсируют также первую гармонику погрешности деления лимба.

Еще один метод центрирования основан на измерении погрешности угла поворота, определяемого по лимбу. Измерения производят сравнением угла поворота оси, задаваемого с помощью эталонного зеркального полигона 1 и автоколлиматора 2, с углом, измеренным по лимбу 3 и отсчетному микроскопу 4 (рис. 4.40).

По графику измеренной погрешности (рис. 4.41) выявляют ее составляющую, обусловленную установочным эксцентриситетом лимба и первой гармоникой погрешности деления. Эта составляющая может считаться результатом действия некоторого суммар-

ного вектора эксцентриситета  $\Delta e_\Sigma$ , численное значение и направление которого определяются с помощью графика  $\Delta\varphi_{\Delta e_\Sigma}$ .

После вычисления  $\Delta e_\Sigma = \Delta\varphi_{\max} \Delta e_\Sigma / (2R)$ , где  $R$  — рабочий радиус лимба, и определения его фазы  $\theta_n$  смещают лимб на величину  $\Delta e_k = \Delta e_\Sigma$  в сторону, противоположную  $\Delta e_\Sigma$ , создавая этим коррекционное воздействие  $\Delta\varphi_k$ , находящееся в противофазе с  $\Delta\varphi_{\Delta e_\Sigma}$ .

Измерение повторно оставшейся погрешности  $\Delta\varphi_{\text{ост}}$  позволяет судить о качестве проведенной коррекции. При правильном ее выполнении гармоника с периодом  $2\pi$  должна отсутствовать. Данный метод более трудоемкий, но позволяет получить высокую точность работы лимба, так как компенсируется не только эксцентриситет установки лимба, но и первая гармоника погрешности его деления.

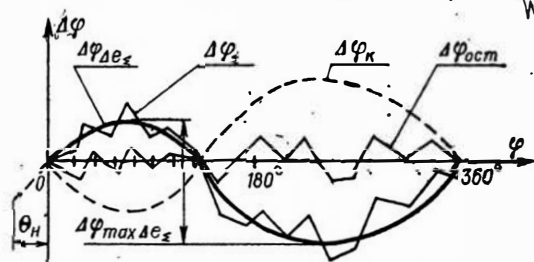


Рис. 4.41. Графики измеренных погрешностей угла поворота лимба:  $\Delta\varphi_\Sigma$  — суммарная погрешность;  $\Delta\varphi_{\Delta e_\Sigma}$  — составляющая погрешности, обусловленная эксцентриситетом;  $\Delta\varphi_k$  — коррекционное воздействие;  $\Delta\varphi_{\text{ост}}$  — остаточная погрешность

Рассмотрим способы центрирования лимбов фотоэлектрических датчиков угловых перемещений, имеющих диаметрально расположенные считывающие системы. При наличии эксцентриситета лимба, а также из-за первой гармонической составляющей погрешности деления лимба электрические сигналы, вырабатываемые считывающими системами, будут иметь периодические (с периодом  $2\pi$ ) погрешности положения, находящиеся

в противофазе. Измерив сдвиг фаз этих сигналов с помощью фазометра, можно судить об эксцентриситете лимба, его направлении и использовать его для центровки лимба.

Для выявления суммарного эксцентриситета лимба в подобных датчиках можно использовать обычный осциллограф. Для этого на вход осциллографа подают сигналы с обеих считывающих систем, причем с одной из них сигнал должен иметь синусоидальную (или пилообразную) форму (такой вид имеет сигнал, полученный с фотоприемника), а с другой системы сигнал должен иметь форму узкого прямоугольного импульса (такой вид имеет сигнал после электронного формирователя). На экране осциллографа при этом будет наблюдаться синусоида и вертикальный штрих, взаимное смещение которых будет свидетельствовать о наличии эксцентриситета лимба. Оценив его, сдвигают лимб перпендикулярно к оси вращения, добиваясь отсутствия взаимного смещения сигналов, что произойдет при устранении выявленного эксцентриситета.

Этот способ благодаря высокой чувствительности и тому, что центровка производится в рабочем состоянии датчика, позволяет существенно повысить точность центровки лимбов с малым шагом

штрихов по сравнению с их центрированием по кольцевой риске (относительное смещение сигналов на экране осциллографа соответствует учетверенному значению эксцентриситета).

Работа на диаметрально противоположных участках лимба основана на применении в приборе двух отсчетных систем, работающих на взаимно противоположных участках лимба. Отсчет, снимаемый по одному из отсчетных устройств (см. рис. 4.39), будет увеличен на погрешность от эксцентриситета лимба, а отсчет по другому устройству — уменьшен на эту же величину:

$$O_1 = 0 + \Delta U_{\Delta e}/R; \quad O_2 = 180^\circ - \Delta U_{\Delta e}/R.$$

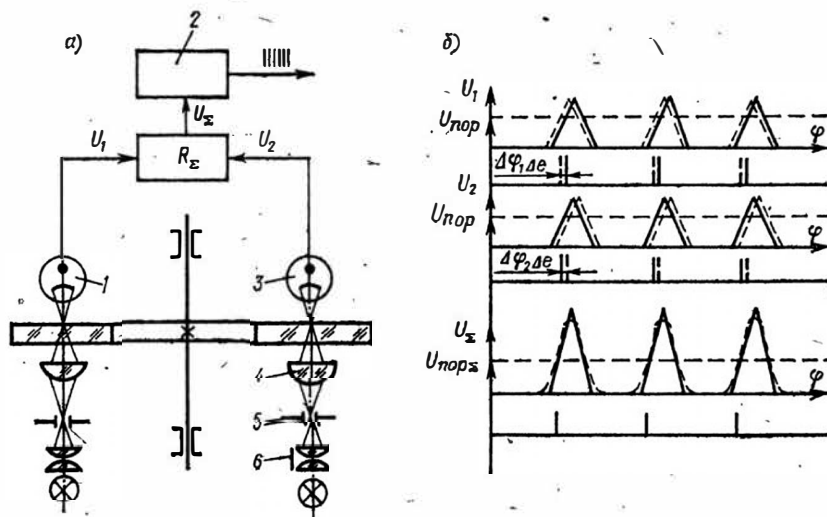


Рис. 4.42. Компенсация эксцентриситета лимба фотоэлектрического датчика угловых перемещений: а — схема датчика; б — схема пространственного расположения электрических импульсов

При измерении некоторого угла  $\varphi_0$  по первому отсчетному устройству получим  $\varphi_1 = \varphi_0 + \Delta\varphi_{\Delta e}$ , по второму —  $\varphi_2 = \varphi_0 - \Delta\varphi_{\Delta e}$ . Это позволяет получить значение угла без погрешности от эксцентриситета лимба:  $\varphi_0 = (\varphi_1 + \varphi_2)/2$ . Очевидно, что при двойном отсчете происходит компенсация первой и всех нечетных гармоник погрешностей деления лимба. Так как большой эксцентриситет лимба приводит к изменению цены деления отсчетного микроскопа [11], то при сборке лимб обычно центрируют одним из вышеописанных способов.

Данный метод компенсации получил широкое распространение и в фотоэлектрических угловых датчиках, основанных на растровых лимбах. На рис. 4.42, а изображена схема фотоэлектрического датчика, преобразующего угол поворота вала с лимбом в серию последовательных электрических сигналов (вырабатываемых фотоприемниками 1, 3), определяющих его пространственное положение.

Наличие эксцентриситета приводит к тому, что на одном конце лимба изображение светящейся щели 5, создаваемой осветительной 6 и проекционной 4 системами в плоскости штрихов лимба, начинает модулироваться раньше, а на противоположном конце — позже (рис. 4.42, б). В случае одностороннего считывания это приводит к погрешности измерения угла, так как формируемые электронной системой обработки сигнала по некоторому пороговому напряжению  $U_{\text{пор}}$  импульсы, являющиеся мерой угла, будут смещены.

При двухстороннем считывании и суммировании сигналов с фотоприемников на некотором сопротивлении  $R_{\Sigma}$  происходит взаимокompенсация погрешностей их расположения. В результате этого

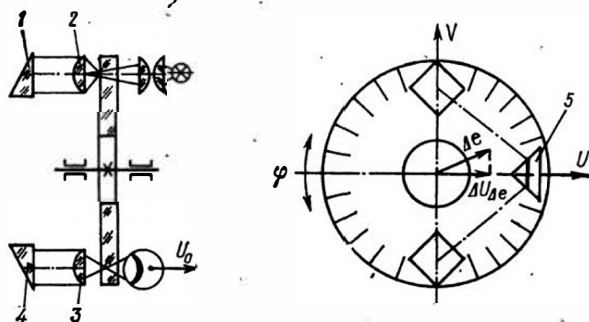


Рис. 4.43. Схема фотозлектрического углового датчика

импульсы, формируемые системой 2 по переднему фронту суммарного сигнала, не претерпевают смещения из-за эксцентриситета лимба. Из рис. 4.42, б видно, что полная компенсация произойдет в том случае, когда сигналы с фотоприемников будут согласованы по фазе и равны. В работе [6] показано, что в подобных системах погрешность компенсации существенно зависит от разности световых потоков в отсчетных ветвях и определяется выражением

$$\Delta\varphi_{\text{ПК}} = \sin \theta \Delta e \Delta\Phi / (2R\Phi),$$

где  $\Delta\Phi$  — разность световых потоков.

Кроме того, на разность сигналов с фотоприемников будут влиять разность их чувствительностей и качество юстировки проекционных систем и фотоприемников (разворот изображения и расфокусировка светящегося штриха относительно штрихов лимба, перекос торца чувствительной площадки фотоприемника). Вследствие этого данная система компенсации работает тем лучше, чем меньше сборочный эксцентриситет лимба и его торцевое биение. Поэтому при сборке необходимо производить его предварительное центрирование и нивелировку.

Еще одним примером рассматриваемого способа компенсации может служить схема компенсации эксцентриситета путем переноса изображения освещенного штриха лимба с одного участка на противоположный. Благодаря тому что проекционная система, состоящая из объективов 2, 3 (рис. 4.43), прямоугольных призм 1, 4 и призмы

с крышей 5 создает увеличение  $\beta = 1 \times$ , изображение светящейся щели, движущееся навстречу модулирующим его штрихам противоположного участка лимба, перемещается из-за влияния эксцентриситета лимба на величину  $y' = (\sin \theta \Delta e) \beta = \Delta U_{\Delta e}$ , равную перемещению вдоль этой оси нижней части лимба. В результате не возникает погрешности взаимного расположения электрических импульсов, определяющих угол поворота лимба.

Смещение изображения, создаваемого оптической системой, применяются в связи с тем, что производительность работы визуальных углоизмерительных приборов с двойным отсчетом ниже, чем приборов с одним отсчетом. Суть этого способа состоит в том, что если создать перемещение индекса, по которому производится отсчет, на величину  $\Delta U_{\Delta e}$  или, наоборот, сместить изображение шкалы на  $-\Delta U_{\Delta e}$ , то, несмотря на наличие эксцентриситета, погрешности отсчета не возникает (см. рис. 4.37, а).

В некоторых приборах этот способ компенсации реализуется посредством смещения индекса, в качестве которого используют изображение кольцевой риски лимба. Такое решение позволяет упростить конструкцию и юстировку прибора. На рис. 4.44 приведена схема оптического угломерного стола, в котором изображение кольцевой риски 1 лимба 2 проектируется с увеличением  $1 \times$  объективом 4 и системой призм в плоскость его биштрихов. Затем изображение участка риски и биштрихов проектируется объективом 3 на экран 5. В этом случае сдвиг проектируемого элемента риски и его изображения (при отсутствии ошибки рен) вдоль оси  $U$  из-за влияния эксцентриситета лимба равен сдвигу совмещаемого с ним биштриха, поэтому влияние эксцентриситета автоматически исключается [22].

Другим вариантом рассматриваемого способа компенсации является перемещение изображения штриха лимба относительно неподвижного индекса или щели-анализатора на величину, компенсирующую влияние сдвига лимба из-за влияния эксцентриситета. Это смещение осуществляется чаще всего с помощью наклонной плоскопараллельной стеклянной пластинки, введенной в отсчетную систему. На рис. 4.45 изображена схема устройства для контроля кодовых дисков<sup>1</sup>. При повороте вала 1 с лимбом 2 происходит наклон плоскопараллельной пластины 8 посредством зубчатых колес 4, 3, имеющих передаточное число, равное 1, эксцентрика 5 и рычага 6. При небольших углах наклона пластинки изображение штриха лимба будет смещено относительно щели-анализатора 7 на величину

$$\Delta L_K \approx (n - 1) d \sin(\varphi + \theta_{\text{кн}}) \Delta e_K / (nR),$$

где  $n$ ,  $d$  — показатель преломления стекла пластины и ее толщина соответственно;  $\varphi$  — угол поворота лимба;  $\theta_{\text{кн}}$ ,  $\Delta e_K$  — начальная фаза и численное значение вектора эксцентриситета эксцентрика;  $R$  — длина рычага.

<sup>1</sup> А. с. 158106 (СССР).

С другой стороны, смещение изображения штриха из-за влияния эксцентриситета лимба равно

$$\Delta L_{\Delta e} = \beta (\sin \varphi + \theta_{en}) \Delta e,$$

где  $\beta$  — линейное увеличение проекционного объектива 9;  $\theta_{en}$ ,  $\Delta e$  — начальная фаза и численное значение вектора эксцентриситета лимба.

Для компенсации необходимо обеспечить условие  $\Delta L_k = -\Delta L_{\Delta e}$ . В связи с этим в конструкции необходимо предусмотреть регулировку  $\Delta e_k$  и  $\theta_{en}$  по конкретным значениям  $\Delta e$  и  $\theta_{en}$  либо вместо эксцентрика поставить кулачок, профилированный по измеренной

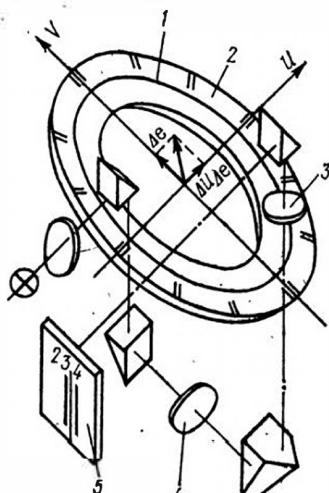


Рис. 4.44. Схема углоизмерительного стола

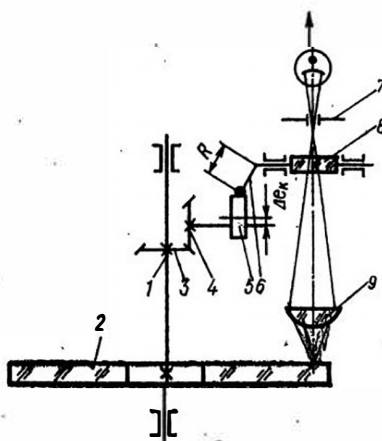


Рис. 4.45. Схема устройства для контроля кодовых дисков

погрешности лимба. Из-за сложности конструкции и трудоемкости юстировки подобные устройства применяют довольно редко.

**Компенсация погрешностей деления лимба.** Погрешность положения штрихов при делении лимба возникает вследствие многих причин: погрешностей привода стола делительной машины, установки заготовки лимба, наладки машины, резцового инструмента, погрешностей, возникающих из-за колебаний температуры, давления, сил трения, вибраций. При получении фотокопий к этим погрешностям добавляются погрешности из-за неравномерной засветки участков лимба, aberrаций проекционной системы, неправильного ориентирования заготовки копии относительно оригинала и другие. В результате погрешность положения штрихов представляет собой переменную нерегулярную величину (см. рис. 1.16, б). Лимб является замкнутой системой штрихов, поэтому сумма полных погрешностей всех  $N$  его штрихов равна нулю [8]:

$$\sum_{i=1}^N \Delta \varphi_i = \sum_{i=1}^N (\Delta \varphi_{ci} + \Delta \varphi_{oi}) = 0, \quad (4.25)$$

где  $\Delta\varphi_c$ ,  $\Delta\varphi_\phi$  — систематическая и случайная составляющие погрешности положения штрихов соответственно. Систематическая составляющая может быть представлена следующим рядом Фурье, имеющим четные и, нечетные члены разложения:

$$\Delta\varphi_{\Sigma c} = \sum_i^N \Delta\varphi_{ci} = \sum_{n=0}^m a_n \sin n\varphi = \sum_{n=0}^k a_{2n+1} \sin (2n+1)\varphi + \\ + \sum_{n=0}^l a_n \sin 2n\varphi, \quad (4.26)$$

где  $a$  — амплитуда;  $m = k + l$  — число членов разложения, нечетных ( $k$ ) и четных ( $l$ );  $n = 0, 1, 2, \dots, m$ .

Случайная составляющая подчиняется закону Гаусса, причем

$$\Delta\varphi_{\Sigma \phi} = \sum_{i=1}^N \Delta\varphi_{i\phi} = 0. \quad (4.27)$$

*Компенсация систематической составляющей* погрешности деления основана на увеличении числа считывающих систем. Рассмотрим, чему равна погрешность недокомпенсации этой составляющей при применении двух диаметрально противоположных отсчетных устройств (см. рис. 4.39). Измеряемый угол определяем при этом как полусумму его значений по одному и другому устройствам (суммируем и усредняем погрешности положения диаметрально противоположных штрихов лимба). Систематическая составляющая погрешности одного из них может быть записана согласно выражению (4.26)

в виде  $\Delta\varphi_{ci} = \sum_{n=0}^m a_n \sin n\varphi_i$ , а для противоположного штриха

$\Delta\varphi_{c(i+180^\circ)} = \sum_{n=0}^m a_n \sin n(\varphi_i + 180^\circ)$ . При их суммировании и усреднении с учетом того, что нечетные члены разложения находятся в противофазах, а четные — в фазе, получим недокомпенсацию погрешностей среднего из двух отсчетов:

$$\Delta\varphi_{\Sigma \text{ н.к.}} = \frac{1}{2} \left\{ \left[ \sum_{n=0}^k a_{2n+1} \sin (2n+1)\varphi_i + \sum_{n=0}^l a_n \sin 2n\varphi_i \right] + \right. \\ \left. + \left[ \sum_{n=0}^k a_{2n+1} \sin (2n+1)(\varphi_i + 180^\circ) + \sum_{n=0}^l a_n \sin 2n(\varphi_i + 180^\circ) \right] \right\} = \\ = \sum_{n=0}^l a_{2n} \sin 2n\varphi_i. \quad (4.28)$$

Таким образом, при двойном (визуальном или фотографическом) отсчете компенсируются только нечетные гармоники систематической составляющей погрешности деления лимба. Для компенсации четных гармоник обычно устанавливают две считывающие системы, расположенные под углом  $90^\circ$  по отношению к первым двум системам. Однако, как показано в работе [8], при этом происходит компенсация не всех четных гармоник.

Действительно, для новой системы мы также имеем недокомпенсацию, равную

$$\Delta\varphi_{\Sigma \text{ НК}}^{\text{II}} = \sum_{n=0}^I a_{2n} \sin 2n\varphi_i + 90^\circ. \quad (4.29)$$

Суммируем и усредняем выражения (4.28) и (4.29), получаем значение недокомпенсации погрешностей среднего из четырех отсчетов:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\Sigma \text{ НК}}^{\text{I+II}} &= \frac{1}{2} \left\{ \left( \sum_{n=1, 3, \dots}^{I/2} a_{2n} \sin 2n\varphi_i + \sum_{n=2, 4, \dots}^{I/2} a_{2n} \sin 2n\varphi_i \right) + \right. \\ &+ \left[ \sum_{n=1, 3, \dots}^{I/2} a_{2n} \sin 2n(\varphi_i + 90^\circ) + \sum_{n=2, 4, \dots}^{I/2} a_{2n} \sin 2n(\varphi_i + 90^\circ) \right] \Big\} = \\ &= \sum_{n=2, 4, \dots}^{I/2} a_{2n} \sin 2n\varphi_i. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Следовательно, при применении четырех отсчетных систем не компенсируются, начиная с четвертой, гармоники, кратные четырем. Так как с увеличением номера гармоники не обязательно происходит уменьшение ее амплитуды, то применение только двух отсчетных систем не может считаться достаточным для компенсации систематической составляющей погрешности деления. Применение четырех отсчетных систем позволяет осуществить эту компенсацию более полно, причём в зависимости от наличия или отсутствия гармоник той или иной частоты в используемом лимбе и их амплитуд угол между парами отсчетных систем изменяется для осуществления компенсации наиболее сильно влияющей гармоники. Например, из выражения (4.30) видно, что, установив угол, равный  $45^\circ$ , получим компенсацию 4-й, 12-й и других гармоник.

При применении восьми считывающих систем систематическая составляющая практически полностью компенсируется.

*Компенсация случайной составляющей* погрешности деления может быть осуществлена путем повторных измерений одного и того же угла на различных участках лимба (см. п. 1.4). Этот прием позволяет уменьшить погрешность примерно на значение корня квадратного из числа повторных измерений, однако он весьма трудоемок. Использование двух и большего числа отсчетных систем для компенсации систематической составляющей позволяет на столько же уменьшить случайную составляющую.

Еще больший эффект дает использование частичного или полного интегрального считывания, применяемый в фотоэлектрических угловых датчиках. Суть его состоит в том, что считывающая система работает не по одному, а по  $n$  штрихов лимба или по всем штрихам одновременно. При частичном интегрировании для этого на лимб проектируется не одна светящаяся щель (см. рис. 4.42, а), а сетка с  $n$  освещенными штрихами. При этом размер и шаг штрихов сетки, а также увеличение проекционной системы подбирают так, чтобы ее изображение было подобно шкале лимба.



На рис. 4.46 приведена схема фотоэлектрического углового датчика с частичным интегральным считыванием, в котором для этих целей используют сетки 3 (или неподвижный лимб), установленные вблизи подвижного лимба 2, модулирующего пучок света, проходящий через  $n$  прозрачных штрихов на фотоприемник 1. При суммировании и усреднении сигналов на фотоприемнике от  $n$  штрихов погрешность положения импульса, выработанного по суммарному сигналу, согласно теореме Чебышева будет иметь среднее значение, равное систематической составляющей погрешности этого участка лимба ( $\Delta\varphi_{ci}$ ), и дисперсию

$$D_{\Sigma i} = D_i/n,$$

где  $D_i$  — дисперсия случайной погрешности штрихов лимба. Таким образом, при достаточно большом  $n$  погрешность положения лимба существенно уменьшается и определяется в основном его систематическими составляющими.

Рассмотрим теперь, как влияет погрешность шага штрихов неподвижной сетки или элемента неподвижного лимба на точность компенсации. Случайная погрешность  $n$  штрихов используемого элемента лимба или сетки имеет математическое ожидание  $M$  ( $\Delta\varphi_{vj}$ ), равное систематической погрешности шага штрихов этого элемента ( $\Delta\varphi_{cj}$ ), и дисперсию  $D_j$ .

При суммировании в случае отсутствия корреляции между погрешностями штрихов лимба и сетки имеем

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{\Sigma cij} &= M(\Delta\varphi_{vi}) + M(\Delta\varphi_{vj}) = \\ &= \Delta\varphi_{ci} + \Delta\varphi_{cj}; \\ D_{\Sigma ij} &= (D_i + D_j)/n. \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

Следовательно, компенсация случайной составляющей ухудшается на величину  $D_j/n$ . Систематическая составляющая погрешности положения лимба ( $\Delta\varphi_{\Sigma cij}$ ) в этом случае является переменной величиной и не может быть сведена к нулю, так как величина  $\Delta\varphi_{ci}$  — также переменная (на разных участках). Для одних положений лимба может оказаться, что  $\Delta\varphi_{\Sigma cij} < \Delta\varphi_{ci}$  вследствие взаимокompенсации  $\Delta\varphi_{ci}$  и  $\Delta\varphi_{cj}$ , а для других —  $\Delta\varphi_{\Sigma cij} > \Delta\varphi_{ci}$ . Это указывает на необходимость предъявлять высокие требования и к точности неподвижных сеток.

При полном интегральном считывании угловое положение лимба определяют по суммарному сигналу, поступающему на фотоприемник от всех  $N$  штрихов лимба. Для этого штрихи вращаемого и подобного ему неподвижного лимба освещают кольцевым источником света, а прошедший поток воспринимают кольцевым фотоприемником (либо применяют оптические системы, позволяющие использо-

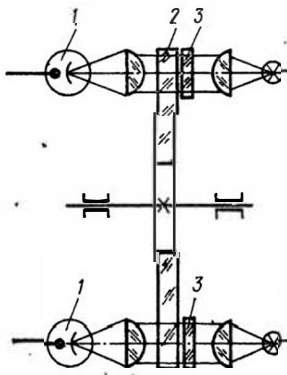


Рис. 4.46. Схема фотоэлектрического углового датчика с частичным интегральным считыванием

вание обычных источников и приемников света). На рис. 4.47 изображена схема углового датчика с полным интегральным съемом<sup>1</sup>, основанного на применении кольцевого источника света 2 и кольцевого фотоприемника 5. При вращении вала 1 с укрепленным на нем лимбом 4 происходит модуляция светового потока, прошедшего через все  $N$  его штрихов и штрихов подобного ему неподвижного лимба 3, на кольцевой фотоприемник.

На рис. 4.48 изображена схема фотоэлектрического датчика<sup>2</sup> с полным интегральным считыванием, использующим обычные источники и приемники излучения. Он состоит из источника света 1, находящегося в фокусе конденсора 2, кольцевых отражающих конусов 3 и 8, подвижного и неподвижного лимбов 6 и 7, объектива 5 и

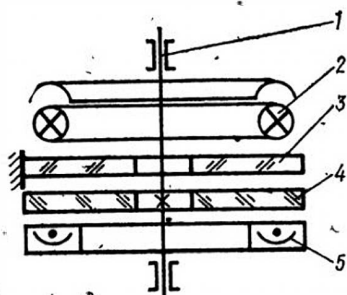


Рис. 4.47. Схема фотоэлектрического углового датчика с полным интегральным считыванием на основе кольцевых источника и приемника излучения

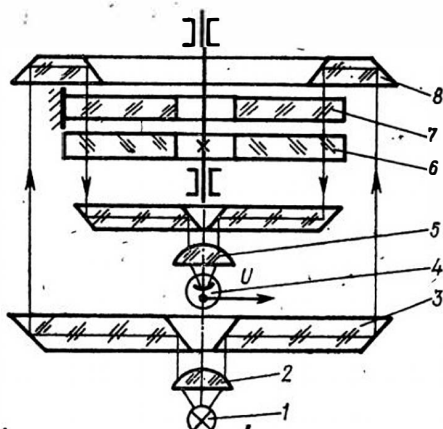


Рис. 4.48. Схема фотоэлектрического углового датчика с полным интегральным считыванием

фотоприемника 4. При вращении лимба 6 световой поток модулируется одновременно всеми щелями и собирается на фотоприемнике, пространственное положение суммарного импульса которого определяет угловое положение лимба.

Так как сумма полных погрешностей всех  $N$  штрихов лимба равна нулю, то часто считается, что при полном интегрировании удастся избавиться от всех погрешностей его изготовления и сборки. Очевидно, что такая полная компенсация погрешностей может произойти при выполнении по крайней мере двух условий: равномерности освещения рабочей поверхности по периметру и отсутствии погрешностей деления неподвижного (либо подвижного) лимба. Равномерность освещения зависит от качества источника света, aberrаций конденсора, децентрировок первого и второго рода внутреннего и наружного отражающих конусов и т. д. Но даже при удовлетворительной равномерности освещения из-за невозможности

<sup>1</sup> А. с. 696280 (СССР).

<sup>2</sup> А. с. 355493 (СССР).

выполнения второго условия (отсутствие погрешностей) следует считать, что дисперсия погрешности углового положения лимба будет равна  $D_{\Sigma N} = (D_i + D_j)/N$ . Следовательно, полной компенсации погрешностей при интегральном считывании достичь не удастся.

#### 4.7. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАВЕДЕНИЯ И СЧИТЫВАНИЯ

В основу функционирования многих оптических приборов (теодолитов, автоколлиматоров, измерительных микроскопов) положена операция совмещения изображения и марки, наблюдаемых оператором с последующим снятием отсчета по шкалам. При этом из-за ограниченной остроты зрения и других причин [34] оператор не может абсолютно правильно расположить изображение относительно марки и оценить на глаз расстояние от штриха до индекса (т. е. долю деления шкалы). Возникают так называемые погрешности наведения (совмещения) и считывания, которые оказывают сильное влияние на точность работы этих приборов.

**Погрешность поперечных наводок.** Вследствие того, что дифракционное изображение объекта в продольном направлении гораздо больше, чем в поперечном, а также из-за аккомодационных свойств глаз точность продольных наводок гораздо ниже, чем поперечных. Этим объясняется преимущественное использование в оптических приборах поперечных наводок. Точность поперечных наводок характеризуется погрешностью расположения (изображения) объекта с совмещаемой маркой. Эта погрешность обусловлена следующими причинами: плохим качеством механизма управления, пороговой чувствительностью движения органа (рукоятки) управления, ограниченной остротой зрения оператора, параллаксом.

Качество механизма управления определяется плавностью движения механизма управления (т. е. колебанием момента или силы сопротивления на органе управления), жесткостью и инерционностью его звеньев. Пороговая чувствительность движения обусловлена ограниченными психофизиологическими возможностями оператора в осуществлении малых (тонких) перемещений органа управления. Она зависит от размеров и формы органа управления, момента сопротивления движению, тренированности оператора и характера контроля за совершаемым движением.

На рис. 4.49 представлены графики, характеризующие зависимость пороговой чувствительности движения (минимального угла поворота) рукоятки (маховичка) с накаткой для нетренированного оператора в зависимости от момента сопротивления движению и диаметра рукоятки при зрительном контроле за совершаемым движением. Как видно из графиков, наилучшая чувствительность движения достигается при моментах сопротивления движению от 1 до 2 Н·см и диаметре рукоятки от 40 до 60 мм.

Качество механизма и пороговая чувствительность органа управления определяют пороговую чувствительность движения всего

механизма (привода) и, в конечном счете, степень возможности и быстроту совмещения изображения и марки. При проектировании привода управления должны быть обеспечены его жесткость, плавность движения, оптимальные моменты сопротивления движению, размеры органа управления и передаточное отношение от органа управления до перемещаемого объекта. Это позволит получить достаточную чувствительность, не влияющую на погрешность совмещения изображения и марки. В этом случае погрешность наводки будет

определяться ограниченной остротой зрения оператора и параллаксом.

Известно, что погрешность наводки зависит от вида совмещаемых марок и их конструктивных характеристик, типа светофильтров, контрастности изображения, аберраций оптической системы,

данных оператора. Для расчета и компенсации погрешности наводки необходимо знать закон ее рассеяния, наличие систематических составляющих и их причины, факторы, изменяющие погрешность при эксплуатации прибора.

Для получения этих данных автором совместно с А. Соловьевой были проведены исследования погрешности

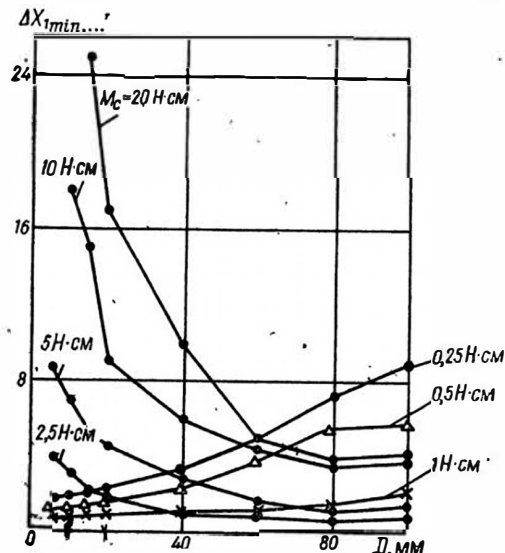
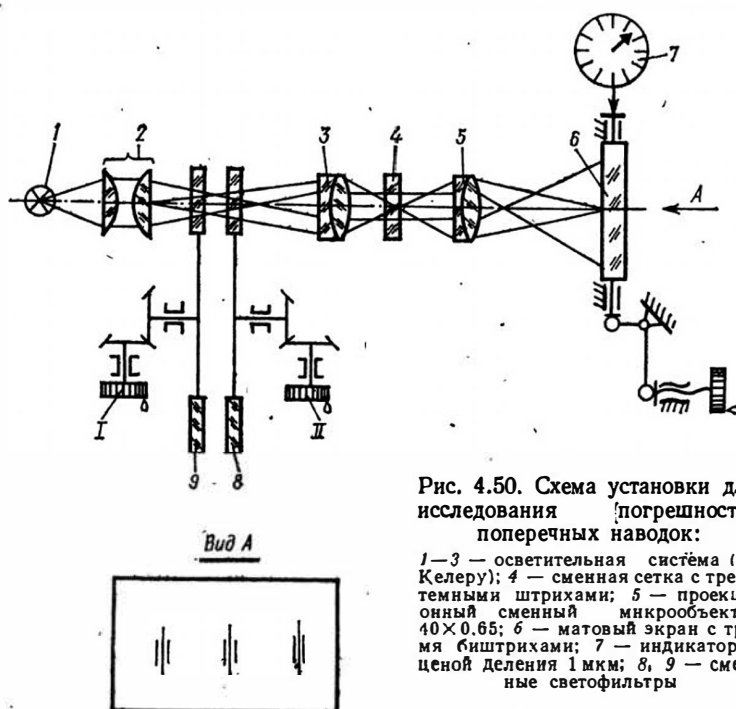


Рис. 4.49. Графики порога чувствительности движения для рукояток с накаткой в случае зрительного контроля за результатом движения

ности совмещения изображения штриха с биштрихом — одного из наиболее часто используемых на практике вида совмещаемых марок. Исследования проводились на установке, изображенной на рис. 4.50. Погрешность совмещения изображения штриха сетки 4 с биштрихом экрана 6 измерялась микронным индикатором при многократных наводках, осуществляемых винто-рычажным приводом. Для оценки влияния на результат исследований мертвого хода индикатора он был измерен в десяти точках рабочего диапазона и не превосходил 1,5 мкм. Определение числовых характеристик и закона рассеяния производилось по результатам из 50—200 совмещений, выполняемых с разных направлений (слева направо и справа налево). Роль влияющих факторов определялась по изменению числовых характеристик погрешности при изменении типа светофильтров, освещенности, положения предмета наблюдения в поле зрения проекционного объектива и замене проекционного объектива.

На рис. 4.51 представлены полигоны рассеяния погрешности совмещения для случая наводок на матовом экране без светофиль-

тров (объем выборки — 200), которые являются типичными и для других условий наблюдения. Проверка законов рассеяния по критерию согласия Пирсона показала, что они подчиняются композиции



закона Гаусса и равной вероятности, либо (что получалось реже) закону Гаусса. Такое сочетание законов рассеяния объясняется тем, что существует некоторая зона  $e$ , ограниченная линиями  $a$

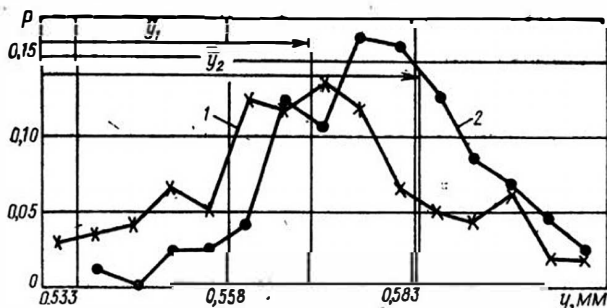


Рис. 4.51. Полигоны рассеяния положений марки экрана при повторных совмещениях с изображением штриха-  
1—2 — для наводок слева и справа соответственно

и  $b$  (рис. 4.52), при нахождении в которой изображения штриха оператор не замечает неравенства отрезков  $c$  и  $d$ . Этой зоне соответствует закон равной вероятности рассеяний положения биштриха относи-

тельно штриха при повторных наводках. Если же край штриха выходит за линию  $a$  или  $b$ , но не переходит линии  $a'$  или  $b'$ , то он попадает в зону, которую условно можно назвать зоной неустойчивой чувствительности: оператору начинает казаться, что отрезки  $c$  и  $d$  не равны, причем уверенность в этом возрастает при приближении к границе  $a'$  или  $b'$ . Этой зоне соответствует закон Гаусса. Если же

край штриха выходит за линию  $a'$  или  $b'$ , то оператор уверенно замечает неравенство отрезков и приводит изображение в зону  $e'$ .

Величина и соотношение зон  $e$  и  $e'$  зависят от многих факторов: размеров  $h$  и  $H$ , апертуры объектива, контраста, освещенности, длины волны света, величины и вида aberrаций, вида наводок (нониальное, с биштрихом, наложением), остроты зрения оператора. Эти зоны определяют поле рассеяния положений изображения  $2\delta y = e' - h = c_{\max} - d_{\min}$ . При расчетах полей вероятных значений погрешности важно знать возможные соотношения между зонами  $e$  и  $e'$  (строго говоря, соотношение между законами Гаусса и равной вероятности); так как они могут быть найдены умножением средней квадратической погрешности на значения соответствующих коэффициентов. В проведенных нами исследованиях, носивших ограниченный характер, получены соотношения между  $e$  и  $e'$  от 0 до 0,5.

Необходимо заметить, что на практике часто смешивают понятия погрешность и чувствительность поперечных наводок, принимая в качестве последней среднюю квадратическую погрешность наведения (равную для случая совмещения с биштрихом 6—8", при нониальном совмещении 10—15" и при наложении 30—60"). Под чувствительностью (более правильно — порогом чувствительности) следует понимать то минимальное угловое или линейное смещение изображения, которое может быть замечено

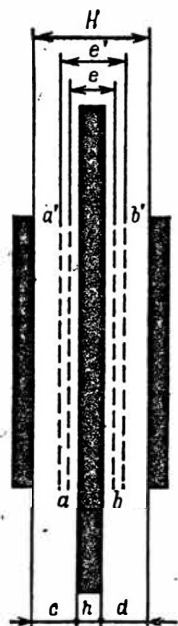


Рис. 4.52. Схема образования рассеяний при совмещении штриха с биштрихом

оператором. Известно, что оператор благодаря дифракционному перераспределению энергии в изображении способен замечать очень малые перемещения, равные в среднем 1/6—1/10 разрешающей способности глаза, но оценить с такой точностью неравенство отрезков  $c$  и  $d$  он не может. В результате поле рассеяния положений изображения штриха  $2\delta y$  много больше порога чувствительности наводок даже в случае, когда другие составляющие погрешности совмещения (качество привода, пороговая чувствительность движения органа управления) оказывают ничтожное влияние.

В наших исследованиях значение  $2\delta y$  в среднем было равно 0,6—1,0 разрешающей способности, а зона  $e$  (без учета  $h$ ) — 1,5—2,0 значениям порога чувствительности.

Вопрос о соотношении между порогом чувствительности и зонами  $e$  и  $e'$  имеет важное значение и нуждается в проведении спе-

циальных исследований. Как видно из рис. 4.51 при изменении направления наводки смещается центр группирования полей рассеяния, что говорит о наличии систематической составляющей погрешности наведения. Это очевидно объясняется психологической ошибкой оператора, заключающейся в том, что он, боясь перевести (или, наоборот, недовести) изображение за центр биштриха, произвольно его не доводит, т. е. оказывается чаще у границы  $a$  при движении слева направо и у границы  $b$  при движении справа налево. Значение этой погрешности зависит в первую очередь от оператора, а также от размера зоны  $e$ . Значение  $\Delta \bar{y} = y_1 - y_2$  для пяти операторов, участвовавших в исследованиях, достигало значений от 5 до 30 мкм.

Таблица 4.1

| Условия наведения |                                                  |                                | Числовые характеристики рассеяния положений биштриха, мм |            |
|-------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| Номер объектива   | Светофильтр                                      |                                | $\bar{y}$                                                | $\sigma_y$ |
| 1                 | Красный КС-11                                    |                                | 0,531                                                    | 0,015      |
|                   | Оранжевый ОС-12                                  |                                | 0,568                                                    | 0,012      |
|                   | Зеленый ЗС-2                                     |                                | 0,607                                                    | 0,013      |
|                   | Сине-зеленый СЗС-8                               |                                | 0,594                                                    | 0,010      |
| 1                 | Без светофильтра                                 | Наводка по центральному штриху | —                                                        | 0,014      |
|                   |                                                  | Наводка по крайнему штриху     | —                                                        | 0,017      |
| 2                 | Без светофильтра, наводка по центральному штриху |                                | —                                                        | 0,008      |
| 3                 |                                                  |                                | —                                                        | 0,014      |
| 4                 |                                                  |                                | —                                                        | 0,009      |

Для исключения появления этой составляющей погрешности наведения следует производить наводки на объект наблюдения с одной стороны, несмотря на отсутствие мертвого хода в кинематической цепи отсчетной системы.

Исследования поперечных наводок, выполняемых при включении различных светофильтров, показали, что изменяется не только средняя квадратическая погрешность ( $\sigma_y$ ), но и смещается центр группирования (табл. 4.1). Изменение величины  $\sigma_y$  обусловлено главным образом различными спектральной чувствительностью зрения оператора и контрастом изображения. Наименьшая погрешность получена для сине-зеленого светофильтра, создающего, видимо, оптимальное соотношение между упомянутыми факторами, что подтверждает рекомендации, изложенные в работе [21]: смещение центра группирования обусловлено изменением центра симметрии

изображения (например, из-за изменения хроматизма увеличения). Для предотвращения появления данной составляющей погрешности наведения не следует производить переключение светофильтров, не закончив цикла измерений.

При замене проекционного объектива (на аналогичный) и при работе на различных участках поля зрения погрешность поперечных наводок существенно изменялась (см. табл. 4.1), что обусловлено изменением величины и вида аберраций.

На рис. 4.53 приведена зависимость средней квадратической погрешности наведения от освещенности. Как видно из рисунка, погрешность увеличивается не только при малых освещенностях (из-за уменьшения контраста и чувствительности глаз), но и при

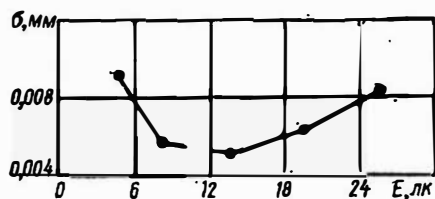


Рис. 4.53. Зависимость среднеквадратической погрешности наведения от освещенности

слишком больших, создающих ослепляющее действие, приводящее к быстрому утомлению оператора. Заметим, что освещенность экранов, работающих на просвет, много меньше освещенности, рекомендуемой для создания на рабочем месте (50—250 лк).

Расчет вероятного поля рассеяния погрешности наведения при выполнении поперечных

наводок из-за ограниченной остроты зрения оператора следует производить по формуле

$$\delta y'' = k\sigma''/\Gamma,$$

где  $\delta y''$  — половина вероятного поля рассеяния;  $k$  — коэффициент, учитывающий доверительную вероятность и соотношение зон  $e$  и  $e'$  (для практически предельного значения значения погрешности  $k = 2,5 \div 3$ );  $\sigma''$  — среднее квадратическое значение погрешности совмещения в угловой мере;  $\Gamma$  — видимое увеличение, при котором производится наблюдение совмещаемых объектов (марок).

В линейной мере

$$\delta y = lk\sigma''5 \cdot 10^{-6}/\Gamma,$$

где  $l$  — расстояние от оператора до наблюдаемых марок.

Для отсчетного микроскопа погрешность наведения вызывает погрешность положения предмета

$$\delta y = 250k\sigma''5 \cdot 10^{-6}/\bar{\Gamma},$$

где  $\bar{\Gamma}$  — видимое увеличение микроскопа.

Для телескопической системы погрешность положения объекта будет иметь вид:

$$\delta y'' = k\sigma''/\Gamma_T; \delta y = Lk\sigma''5 \cdot 10^{-6}/\Gamma_T,$$

где  $\Gamma_T$  — увеличение телескопической системы;  $L$  — расстояние от системы до объекта наблюдения.



При несовпадении по глубине плоскости изображения и марки возникает параллакс — сдвиг изображения предмета относительно марки при поперечных смещениях глаза оператора. Так как смещение глаза оператора в пределах некоторой зоны (например, выходного зрачка системы) является случайной величиной, то погрешность наводок из-за параллакса также случайна.

Максимальная погрешность из-за параллакса определяется наибольшим возможным смещением глаза оператора:

при наблюдении невооруженным глазом:

$$\Delta y = \Delta p t_{\max} / a, \quad (4.32)$$

где  $\Delta p$  — расстояние между изображением предмета и маркой (продольный параллакс);  $t_{\max}$  — максимальное смещение глаз оператора;  $a$  — расстояние от оператора до марки ( $a = 250$  мм);

при наблюдении через окуляр (лупу)

$$\Delta y = \Delta p t_{\max} / f' = \Delta p t_{\max} \Gamma / 250;$$

для отсчетного микроскопа

$$\Delta y = \Delta p t_{\max} \Gamma / (250\beta),$$

где  $\beta$  — увеличение микрообъектива;

для телескопической системы

$$\Delta y'' = \Delta p t_{\max} \Gamma 206\,265 / (250f'); \quad \Delta y = L \Delta p t_{\max} \Gamma / (250f').$$

Погрешность наведения из-за параллакса может быть существенно уменьшена устранением его при юстировке прибора. Это достигается взаимным смещением сетки или объектива либо результиративной обработкой их оправ.

**Погрешность считываний по шкалам.** При снятии отсчета по шкале оператор оценивает на глаз долю ее деления. Погрешность такой оценки обусловлена ограниченными психофизиологическими возможностями оператора и параллаксом штрихов шкалы и индекса. Даже при отсутствии параллакса точность глазомерной оценки весьма невысока (не более 0,1—0,05 деления шкалы). Поэтому в том случае, когда необходимо снимать отсчеты с точностью до 0,1 деления и выше, применяют специальные устройства (нониусы, микрометры).

Как известно, погрешность отсчитывания по шкалам зависит от интервала, толщины, освещенности, контрастности штрихов шкалы и содержит как систематическую, так и случайную составляющие. Систематическая составляющая погрешности оценки долей деления постоянна для каждого оператора (но различна для отдельных операторов) и заключается в том, что он приписывает отсчету всегда большее (либо меньшее) значение, чем имеется на самом деле, причем величина этой погрешности переменна в зависимости от значения оцениваемой доли интервала.

При расчетах погрешность считывания целиком относят к случайным (так как систематические погрешности операторов различны

и заранее неизвестны). Наибольшее значение погрешности отсчета находится по формуле

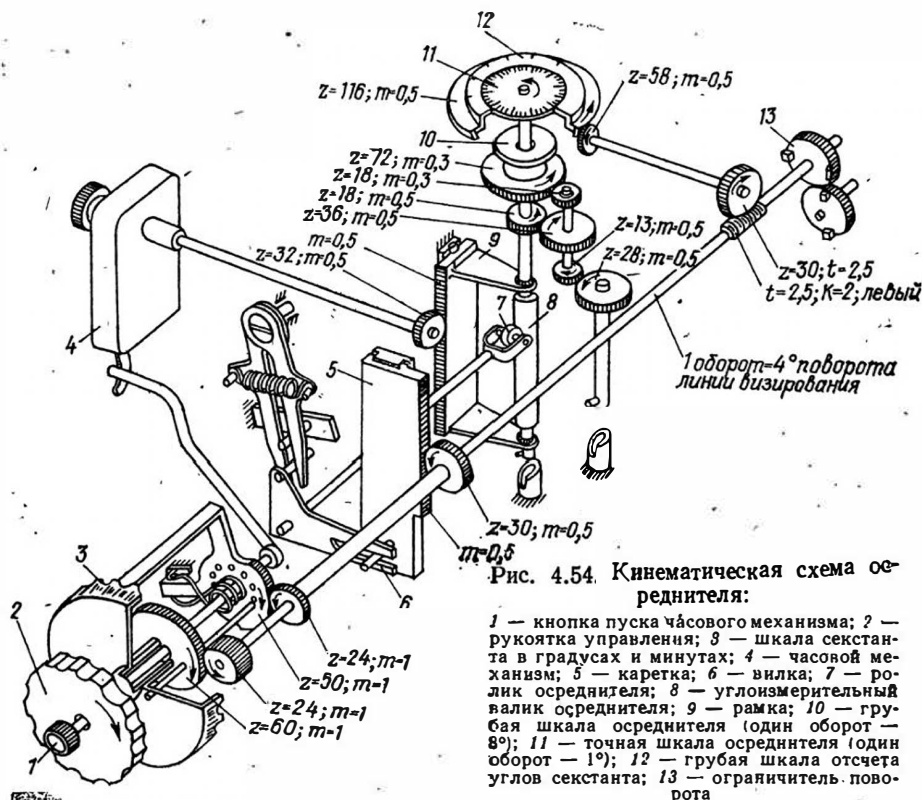
$$\Delta y_{c \max} = 0,5A \Delta n,$$

где  $A$  — цена деления;  $\Delta n = 1; 0,5; (0,25); 0,2; 0,1$  — оцениваемая на глаз доля деления шкалы.

Расчет максимальной погрешности отсчитывания из-за параллакса производят по формуле, аналогичной (4.32)

$$\Delta y_{c \Delta p} = A t_{\max} \Delta p / (an),$$

где  $n$  — интервал деления.



**Интегрирующие устройства.** Случайные составляющие погрешностей наведения и считывания на практике часто компенсируют путем увеличения числа повторных циклов функционирования прибора. В связи с широким применением в оптических приборах фотоэлектрических отсчетных систем и микро-ЭВМ, позволяющих автоматизировать процесс отсчитывания и обработки результатов, трудоемкость такого метода компенсации может быть существенно снижена. Примером коррекции погрешности наведения могут служить двух- и трехкоординатные измерительные машины (микро-скопы), фотоэлектрический окулярный микрометр, фотоэлек-

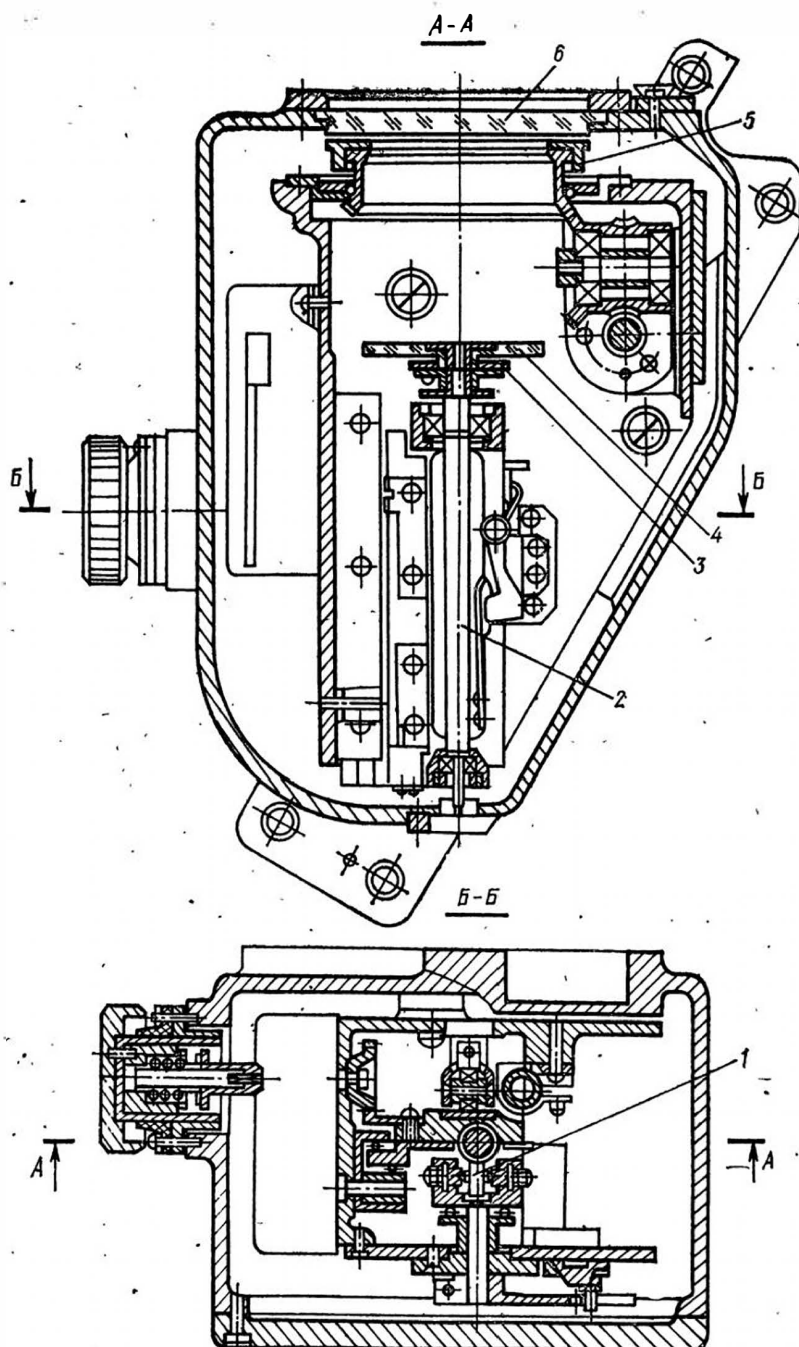


Рис. 4.55. Устройство узла осреднителя:

1 — ролик; 2 — валтик осреднителя; 3 — грубая шкала осреднителя; 4 — точная шкала осреднителя; 5 — грубая шкала секстанта; 6 — защитное стекло

трические теодолиты, в микро-ЭВМ которых предусмотрена программа вычисления среднего значения результата многократного наведения прибора на объект наблюдения.

Хорошие результаты коррекции погрешности наведения получают также с помощью механических интегрирующих устройств, используемых, например, в авиационных секстантах, секстантах навигационных перископов, работающих в сложных условиях наводки из-за качки судна, вибраций и дрожания рук оператора. Эти устройства позволяют вместо одиночного измерения высоты светила производить непрерывное измерение, в течение некоторого промежутка времени (обычно 40, 120 или 200 с), во время которого оператор удерживает изображение светила в центре марки. При этом на угломерном барабане осреднителя отсчеты углов будут то уменьшаться, то увеличиваться (алгебраически суммироваться). На рис. 4.54 изображена кинематическая схема осреднителя одного из таких секстантов.

Ролик 7 и валик 8 осреднителя находятся во фрикционном соединении друг с другом. В нейтральном положении их оси перпендикулярны друг к другу. При пуске часового механизма рамка 9, несущая валик, с помощью реечной передачи перемещается поступательно с равномерной скоростью в шариковых направляющих. Повороты рукоятки 2 управления секстантом, выполняемые оператором для совмещения изображения светила с маркой, приводят к перемещению каретки 5 и развороту ролика осреднителя. Перпендикулярность между осями валика и ролика нарушается и к поступательному движению валика добавляется под действием ролика вращательное движение. Переместившись на рабочий ход 1, валик развернется на некоторый угол  $\varphi$ , представляющий собой суммарное значение всех его положительных и отрицательных поворотов за время работы часового механизма

$$\varphi = \int_0^1 \operatorname{tg} \alpha \, dl/r,$$

где  $\alpha$  — угол поворота оси ролика от номинального положения в некоторый момент времени;  $dl$  — перемещение валика;  $r$  — радиус валика.

Конструктивно данный осреднитель выполнен в виде автономного узла (рис. 4.55).

#### 4.8. КОМПЕНСАТОРЫ НИВЕЛИРОВ С САМОУСТАНОВЛИВАЮЩЕЙСЯ ЛИНИЕЙ ВИЗИРОВАНИЯ

Для повышения производительности и точности работ современных нивелиров применяют специальные устройства (компенсаторы), автоматически устанавливающие визирную линию в горизонтальное положение. Принцип работы этих компенсаторов основан на том, что при наклонах нивелира, обусловленных погрешностью его выставки или неустойчивостью основания (грунта), они изменяют

ход визирной оси в приборе для создания горизонтальной линии визирования в пространстве предметов. Достигается это смещением сетки либо поворотом или переносом визирной оси.

На рис. 4.56, а—г представлены схемы способов компенсации угла наклона зрительной трубы нивелира [17]: компенсация угла наклона благодаря перемещению сетки нивелира при его наклоне на угол  $\epsilon$  из положения  $Z$  в положение  $Z_0$  рычагом с плечом  $S$ , поворачиваемым в точке  $P$  на угол  $\epsilon'$  (рис. 4.56, б); если точка  $P$  совпадает с узловой точкой объектива, то  $S = f'$ , а  $\epsilon' = \epsilon$ ; компенсация угла наклона поворотом визирной оси с помощью зеркала, призмы или линзы, установленной в точке  $P$  (рис. 4.56, в) и компенсация переносом визирной оси с помощью зеркально-призменной системы (рис. 4.56, г).

Для первых двух схем компенсации угла наклона (б и в) должно выполняться условие:  $f'\epsilon = S\epsilon'$ , а для третьей схемы (г) —  $f'\epsilon = k_{\text{д}}S\epsilon$ , где  $S$  — длина рычага или длина хода оси визирования от точки ее падения на зеркало или призму компенсатора до сетки;  $k_{\text{д}}$  — коэффициент, зависящий от числа отражений визирного луча в зеркально-призменной системе компенсатора.

Из этих равенств вытекает основное уравнение компенсаторов, расположенных за объективом нивелира:  $f'/S = \epsilon'/\epsilon = k$ , где  $k$  — коэффициент компенсации. Обычно компенсатор представляет собой механический или гидромеханический маятник. Для получения необходимого значения коэффициента компенсации подвеску маятника рассчитывают так, чтобы при наклоне визирной трубы на угол  $\epsilon$  компенсатор отклонял визирный луч на угол  $\epsilon' = k\epsilon$ . Необходимое значение коэффициента  $k$  достигается механическими, оптическими или оптико-механическими средствами. Компенсаторы могут быть установлены в сходящемся и в параллельном пучке лучей перед объективом зрительной трубы нивелира.

Основными факторами, влияющими на погрешность стабилизации линии визирования компенсаторами, являются:

1. Нарушение уравнения компенсации из-за изменения эквивалентного фокусного расстояния или расстояния  $S$  при перефоку-

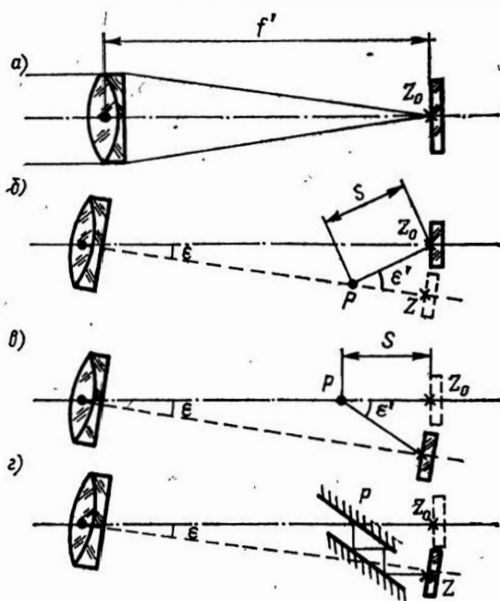


Рис. 4.56. Схемы способов стабилизации линии визирования нивелиров

сировке зрительной трубы на разноудаленные объекты наблюдения. Для исключения этой погрешности применяют объективы, фокусное расстояние которых не изменяется при перефокусировке, либо компенсаторы, обеспечивающие соответствующее изменение значений  $S$  или  $k$ . Нечувствительными к погрешности из-за перефокусировки являются компенсаторы, установленные перед объективом (например, компенсатор нивелиров  $N_1-D1$ , ТНЗ).

2. Изменение высоты узловой точки объектива при наклонах нивелира. Эту погрешность можно уменьшить, если уменьшить расстояние (вылет) от объектива до центра его поворота; если изменить наклон нивелира (например с помощью уровня), то можно также ввести поправки в отсчет на эту погрешность.

3. Ограниченная чувствительность маятниковой системы, обусловленная силами трения в точке подвеса, явлениями гистерезиса, качеством демпфирования. Для повышения чувствительности маятниковой системы применяют, например, высокочувствительные двойные и тройные шарикоподшипниковые подвески [30], комбинацию шарикоподшипниковой и нитяной подвесок, стабильные магнитоиндукционные и воздушные демпферы.

4. Перепад температур, приводящий к изменению фокусного расстояния объектива и линейных размеров элементов, входящих в уравнение компенсации, а также к ухудшению чувствительности подвески. Для уменьшения влияния этого фактора применяют термокомпенсаторы, а также используют малочувствительные к изменению температуры подвески.

5. Погрешности юстировки компенсатора, приводящие к нарушению соотношений уравнения стабилизации, для устранения которых следует выявить факторы (первичные погрешности) технологического характера, влияющие на точность стабилизации, определить допуски на них и составить обоснованную методику юстировки компенсатора.

Применение, устройство и исследование нивелиров с компенсаторами подробно описаны в работах [17, 47]. Остановимся подробнее на расчете допусков на погрешности юстировки и рекомендациях по ее выполнению. Рассмотрим это на примере юстировки компенсаторов авторедукционных нивелиров ТНЗ<sup>1</sup> и ТН7 [26].

**Юстировка компенсаторов.** На рис. 4.57 приведена схема технического нивелира ТНЗ с самоустанавливающейся линией визирования. В этом нивелире компенсация влияния углов наклона производится с помощью прямоугольной призмы 2, подвешенной как маятник к горизонтальной оси качания. Ось качания смонтирована на малогабаритных сверхлегких шарикоподшипниках. Колебания призмы гасятся магнитоиндукционным демпфером. Диапазон стабилизации, равный  $\pm 45'$ , ограничивается взаимным наклоном изоб-

---

<sup>1</sup> А. с. 203936 (СССР).

ражения рейки и горизонтального штриха сетки при наклонах нивелира. При наклоне нивелира относительно оси  $Y$  возникает разворот сетки, а при наклонах относительно оси  $X$  — разворот изображения рейки. Клин 1 служит для выставки линии визирования в горизонтальную плоскость и выполняет роль защитного стекла. В правильно отъюстированной системе визирная ось трубы параллельна оси качания призмы и направлена противоположно оси  $X$  по орту  $\vec{A}_0$ . Нормаль отражающей грани находится в плоскости горизонта и направлена по орту  $\vec{N}_0$  под углом  $45^\circ$  к оси качания. Визирная ось в пространстве предметов находится в плоскости горизонта и направлена по орту  $\vec{A}'_0$  вдоль оси  $Y$ .

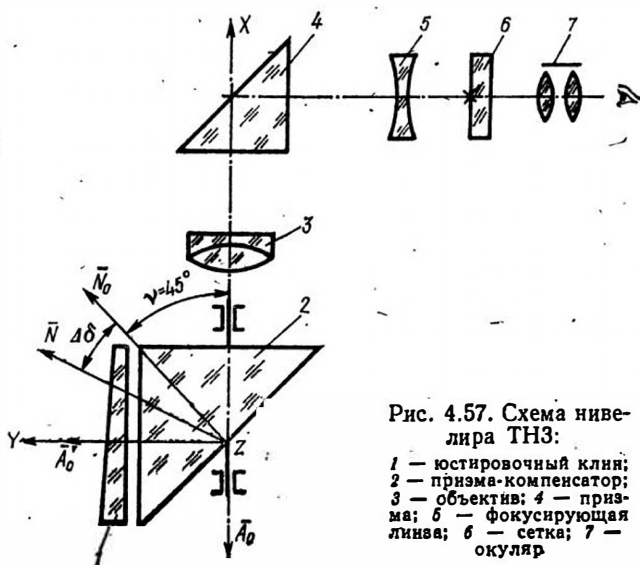


Рис. 4.57. Схема нивелира ТНЗ:

1 — юстировочный клин;  
2 — призма-компенсатор;  
3 — объектив; 4 — призма;  
5 — фокусирующая линза; 6 — сетка; 7 — окуляр

На погрешность стабилизации линии визирования влияют следующие погрешности юстировки компенсатора: 1) отклонение угла между осью качания призмы и ее нормалью к отражающей грани от номинального значения ( $45^\circ$ ) на величину  $\Delta\delta$ ; 2) непараллельность оси визира по отношению к оси качания призмы в горизонтальной плоскости на угол  $\Delta\gamma$  и в вертикальной — на угол  $\Delta\beta$ ; 3) непараллельность нормали призмы горизонтальной плоскости (неотвесность отражающей грани) на величину  $\Delta\psi$ ; 4) дестабилизирующее действие юстировочного клина.

Рассмотрим влияние указанных погрешностей на погрешность стабилизации линии визирования, т. е. отклонение линии визирования в пространстве предметов из горизонтальной плоскости. Для этого следует определить проекцию орта линии визирования в пространстве предметов от каждой погрешности при наклонах нивелира вокруг осей  $X$  и  $Y$  на углы  $\alpha$  и  $\varphi$ .

Запишем вектор нормали к отражающей грани призмы с учетом  $\Delta\delta$  в виде

$$\begin{aligned}\bar{N} &= \begin{bmatrix} \sin(45^\circ + \Delta\delta) \\ \cos(45^\circ + \Delta\delta) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \Delta\delta + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \Delta\delta \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cos \Delta\delta - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin \Delta\delta \\ 0 \end{bmatrix} \approx \\ &\approx \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \\ \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \\ 0 \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

Орт падающего луча  $\bar{A}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ . Погрешность  $\Delta\delta$  вызывает отклонение линии визирования при наклонах нивелира вокруг оси Y. Тогда

$$\begin{aligned}\bar{N}_\varphi = S_\varphi \bar{N} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \\ \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \\ 0 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} + \cos \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \\ \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \\ -\sin \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} - \sin \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta\delta \end{bmatrix},\end{aligned}$$

где  $S_\varphi$  — матрица поворота системы координат.

Орт падающего луча в исходной системе:  $\bar{A}^* = \begin{pmatrix} -\cos \varphi \\ 0 \\ \sin \varphi \end{pmatrix}$ . Направление орта линии визирования с учетом  $\Delta\delta$  и  $\varphi$  находится умножением матрицы плоского зеркала ( $M'$ ) на  $\bar{A}^*$  [32]:  $\bar{A}' = M' \bar{A}^*$ . Так как нас интересует только проекция орта на ось z, то  $A'_z = m_{31} A_x + m_{32} A_y + m_{33} A_z = -\cos^2 \varphi \sin \varphi - 2 \cos^2 \varphi \sin \varphi \Delta\delta -$



$-\cos^2 \varphi \sin \varphi \Delta \delta^2 + \cos^2 \varphi \sin \varphi + 2 \sin^3 \varphi \Delta \delta + \sin^3 \varphi \Delta \delta^2$ . Сокращая и учитывая малость угла  $\varphi$  (ограничиваемого диапазоном стабилизации), получаем:

$$A'_z \approx -2\varphi \Delta \delta. \quad (4.33)$$

При наличии  $\Delta \gamma$  орты нормали отражающей грани призмы до и после поворота соответственно равны:

$$\bar{N} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{N}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\sin \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix},$$

а орты вектора падающего луча:

$$\bar{A}_0 = \begin{pmatrix} -\cos \Delta \gamma \\ \sin \Delta \gamma \\ 0 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} -1 \\ \Delta \gamma \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \bar{A}^* = \begin{pmatrix} -\cos \varphi \\ \Delta \gamma \\ \sin \varphi \end{pmatrix}.$$

Проекция орта линии визирования на ось  $Z$  равна

$$A'_z = -\cos^2 \varphi \sin \varphi - \sin \varphi \Delta \gamma + \cos^2 \varphi \sin \varphi \approx -\varphi \Delta \gamma. \quad (4.34)$$

В том случае, когда ось визира непараллельна оси качания призмы в вертикальной плоскости на угол  $\Delta \beta$ , аналогично предыдущему можно записать:

$$\bar{N}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\sin \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}; \quad \bar{A}_0 = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ \Delta \beta \end{pmatrix}; \quad \bar{A}_0^* = \begin{pmatrix} -\cos \varphi + \sin \varphi \Delta \beta \\ 0 \\ \sin \varphi + \cos \varphi \Delta \beta \end{pmatrix}.$$

Проекция орта линии визирования на ось  $Z$

$$A'_z = -\cos^2 \varphi \sin \varphi + \cos \varphi \sin^2 \varphi \Delta \beta + \cos^2 \varphi \sin \varphi + \\ + \cos^3 \varphi \Delta \beta \approx \cos \varphi \Delta \beta. \quad (4.35)$$

Отсюда следует, что влияние этой погрешности практически постоянно и изменяется при наклоне нивелира от 0 до  $\varphi$  на величину второго порядка малости:

$$dA'_z = (1 - \cos \varphi) \Delta \beta \approx \varphi^2 \Delta \beta / 2. \quad (4.36)$$

В случае неотвесности отражающей грани призмы на величину  $\Delta\psi$  получим:

$$\bar{N} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \Delta\psi \end{bmatrix}; \quad \bar{N}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} + \sin \varphi \Delta\psi \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\sin \varphi \frac{\sqrt{2}}{2} + \cos \varphi \Delta\psi \end{bmatrix};$$

$$\bar{A}_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \bar{A}_0^* = \begin{pmatrix} \cos \varphi \\ 0 \\ -\sin \varphi \end{pmatrix}.$$

Проекция орта линии визирования на ось  $Z$  имеет вид

$$A'_z = -\sin^2 \varphi \cos \varphi \sqrt{2} \Delta\psi - \cos^3 \varphi \sqrt{2} \Delta\psi \approx \sqrt{2} \cos \varphi \Delta\psi. \quad (4.37)$$

Влияние этой погрешности также постоянно и изменяется на величину второго порядка малости

$$dA'_z = (1 - \cos \varphi) \sqrt{2} \Delta\psi \approx \varphi^2 \Delta\psi / \sqrt{2}. \quad (4.38)$$

Наиболее сильно дестабилизирующее действие юстировочного клина происходит также при наклоне нивелира вокруг оси  $Y$ .

Как известно, вращение клина вокруг оси падающего пучка приводит к вращению пучка за ребром клина. Относительно вертикальной оси пучок будет отклоняться по зависимости  $A'_z = \sigma \sin \varphi$ , где  $\sigma$  — отклонение пучка лучей клином;  $\varphi$  — угол между перпендикуляром к ребру клина и горизонтальной плоскостью.

При юстировке ребро клина может принять любое положение, в зависимости от которого будет изменяться дестабилизация вследствие изменения  $\varphi$  при работе нивелира

$$dA'_z = \sigma \cos \varphi d\varphi. \quad (4.39)$$

В случае, когда ребро клина перпендикулярно к плоскости горизонта ( $\varphi = 0$ ), получим

$$dA'_z = \sigma d\varphi, \quad (4.40)$$

где  $d\varphi$  изменяется от 0 до величины, определяемой диапазоном работы компенсатора.

Для технических нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования погрешность ее самоустановки не должна превышать  $A'_{zvd} = 5''$ . Найдем допуски  $\Delta_i$  на указанные погрешности по следующей формуле (см. п. 2.4)

$$\Delta_i = \Delta y_{vd} / (K_i \sqrt{n}),$$

где  $\Delta y_{vd}$  — допустимое значение показателя качества;  $K_i$  — передаточный коэффициент погрешности;  $n$  — число погрешностей.

Допустимое значение отклонения нормали отражающей грани от  $45^\circ$  равно

$\Delta\delta_{vd} = A'_{zvd}/(2\varphi\sqrt{n}) = 5'' \cdot 5 \cdot 10^{-6}/(2 \cdot 45' \cdot 3 \cdot 10^{-4} \sqrt{4}) = 4,6 \cdot 10^{-4} \approx 1,5'$ .  
Допустимые значения остальных погрешностей равны соответственно:

$$\Delta\gamma_{vd} = A'_{zvd}/(\varphi\sqrt{n}) = 3'';$$

$$\Delta\beta_{vd} = A'_{zvd}/(\cos\varphi\sqrt{n}) = 2,5'';$$

$$\Delta\psi_{vd} = A'_{zvd}/(\sqrt{2}\cos\varphi\sqrt{n}) = 1,8'';$$

$$dA'_{zvd} = A'_{zvd}/\sqrt{n} = 2,5''.$$

Небольшой диапазон стабилизации позволяет обеспечить последний допуск (при  $\sigma = 3'$ ,  $d\varphi = 45'$   $dA'_{z\max} = \sigma d\varphi = 2,4''$ ). Остальные допуски технологически обеспечить невозможно и при юстировке нивелира требуется их компенсация.

Из выражений (4.35) и (4.37) видно, что погрешности  $\Delta\beta$  и  $\Delta\psi$  могут компенсировать друг друга. Условием взаимокompенсации является выражение  $\Delta\psi = -\Delta\beta\sqrt{2}$ . Влияние данных погрешностей может быть компенсировано также разворотом юстировочного клина. В обоих случаях недокомпенсация их влияния при работе нивелира второго порядка малости, определяемая выражениями (4.36) и (4.38), позволяет расширить технологический допуск на эти погрешности до экономического уровня. Так как погрешность  $\Delta\delta$  не приводит к погрешности стабилизации линии визирования при наклонах нивелира относительно оси  $X$ , то взаимокompенсация влияния погрешностей  $\Delta\delta$  и  $\Delta\gamma$  в общем случае невозможна.

Следовательно, при юстировке инструмента необходима отдельная компенсация каждой погрешности. Для этого в конструкции узла качания призмы должна быть предусмотрена возможность ее разворота относительно оси. Сама ось качания (либо визирная ось трубы) должна иметь возможность поворотов в горизонтальной плоскости.

На рис. 4.58 приведена схема нивелира ТН7, который отличается от нивелира ТН3 большим диапазоном пределов работы компенсатора, равным  $\pm 6^\circ$ , что позволяет производить установку нивелира в горизонт на глаз. Компенсация влияния углов наклона нивелира производится здесь плоским зеркалом 2, подвешенным как маятник в двойной шарикоподшипниковой подвеске. Для устранения разворотов марки сетки, приклеенной к объективу, объектив установлен в оправу, подвешенную на двух осях, одна из которых параллельна оси качания зеркала, а другая совпадает с визирной осью. Колебания подвижных систем гасятся магнитоиндукционными демпферами. Визирная ось нивелира образуется узловой точкой объектива и изображением центра (перекрестия) марки сетки в зеркале 2. На погрешность стабилизации линии визирования влияют аналогичные первичные ошибки: 1) коллимационная ошибка — перпендикулярность нормали зеркала к оси его качания ( $\Delta\kappa$ ); 2) перпендикулярность визирной оси к плоскости зеркала вследствие децентрировки марки сетки относительно узловой точки объектива

( $\Delta e$ ); 3) неотвесность отражающей плоскости зеркала ( $\Delta\psi$ ); 4) дестабилизирующее действие клина.

Как показано в работе [3], первые три первичные погрешности вызывают отклонение линии визирования из горизонта при наклоне нивелира на угол  $\gamma$  вокруг произвольно направленной оси, лежащей в плоскости горизонта, на величину

$$A'_z = \sin \theta \Delta e / f'_{06} - \gamma \cos \omega \Delta k - \Delta\psi, \quad (4.41)$$

где  $\theta$  — направление эксцентриситета сетки;  $\omega$  — угол между осью поворота нивелира и осью  $X$ , направленной вдоль визирной линии. Наибольшая погрешность стабилизации линии визирования воз-

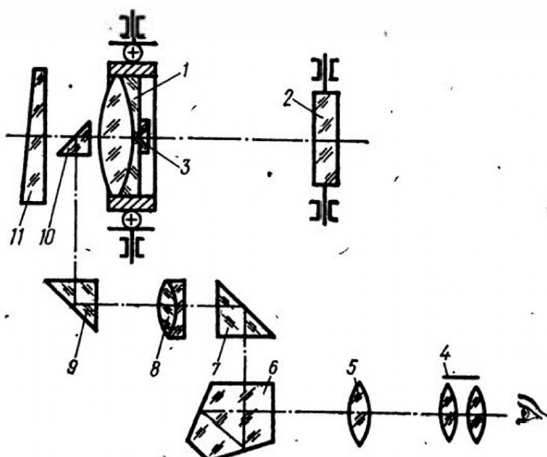


Рис. 4.58. Схема нивелира ТН7:

1 — объектив; 2 — плоское зеркало-компенсатор; 3 — сетка; 4—10 — наблюдательная система; 11 — юстировочный клин

никает при наклонах нивелира вокруг оси  $X$  ( $\omega = 0$ ) и вертикальном направлении вектора децентрировки ( $\theta = 90^\circ$ ).

Дестабилизирующее действие юстировочного клина также равно  $dA'_z = \sigma \cos \varphi d\varphi$ . Исходя из того же допущения на погрешность стабилизации линии визирования, найдем предельные значения допусков на первичные погрешности.

Допустимые значения коллимационной ошибки, децентрировки сетки, неотвесности зеркала и дестабилизации клина будут равны:

$$\Delta k_{vd} = A'_{zvd} / (\gamma \cos \omega \sqrt{n}) = 5'' \cdot 5 \cdot 10^{-6} / (6^\circ \cdot 0,0174 \cdot 1 \cdot \sqrt{4}) \approx 24'';$$

$$\Delta e_{vd} = A'_{zvd} f'_{06} / (\sin \theta \sqrt{n}) = 5'' \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 162 / (1 \cdot \sqrt{4}) \approx 2 \text{ мкм};$$

$$\Delta\psi_{vd} = A'_{zvd} / \sqrt{n} = 2,5'';$$

$$dA'_{zvd} = A'_{zvd} / \sqrt{n} = 2,5''.$$

Так как здесь стабилизирующий угол наклона больше, чем в нивелире ТНЗ, то при  $\sigma = 3'$  и  $d\varphi = 6^\circ$  дестабилизация клина будет

равна  $dA'_{z \max} \approx 20''$ . Указанные допуски выдержать технологически невозможно.

Анализ выражения (4.41) показывает, что погрешности  $\Delta\epsilon$  и  $\Delta\psi$  вызывают постоянное отклонение линии визирования и могут скомпенсировать друг друга. Условием компенсации является выражение  $\Delta\psi = \sin \theta \Delta\epsilon / f_{\text{об}}$ . Следовательно, допуск на  $\Delta\epsilon$  может быть расширен до экономического уровня.

В конструкции крепления зеркала должна быть предусмотрена возможность устранения его коллимационной ошибки. Максимальное значение недокомпенсации с учетом других действующих погрешностей составляет не более 10—15".

Применение юстировочного клина (даже с малыми углами) в широком диапазоне нивелирования нецелесообразно. Из выражения (4.39) следует, что в нашем случае для обеспечения  $dA'_{zd} = 2,5''$  его ребро должно быть параллельно горизонтальной плоскости ( $\varphi = 90^\circ$ ) и отклоняться при юстировке не больше, чем на угол  $\varphi' = \pm \arcsin (dA'_{zd} / \sigma d\varphi) \approx \pm 7^\circ$ .

#### 4.9. АДАПТИВНЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ

Все компенсаторы погрешностей в широком смысле являются адаптивными, так как их параметры приспособляются под конкретные значения корректируемых погрешностей. Условимся под адаптивными компенсаторами понимать такие, которые используются в адаптивной оптике.

Таким образом, адаптивным компенсатором будем называть активный элемент оптической системы, параметры которого изменяются в реальном масштабе времени с целью коррекции погрешностей оптического сигнала (изображения). Управление таким компенсатором, являющимся компонентом замкнутой следящей системы, осуществляется с помощью анализатора изображения (или волнового фронта) и ЭВМ. Анализ изображения или измерение деформаций волнового фронта является главным моментом этого управления.

Различают три метода решения этой проблемы [1]. Первый состоит в том, что производят прямые измерения фазы волнового фронта по апертуре с помощью гетеродинных детекторов. Этот метод применяют в том случае, когда принимаемый сигнал приходит от точечного монохроматического источника (например, лазера). Вторым методом основан на измерении энергии сигнала от источника излучения в фокальной плоскости объектива, третий — на измерении разности фаз между соседними участками волнового фронта (например, с помощью интерферометра сдвига). Наибольшее распространение в адаптивных системах получил метод управления, основанный на максимизации энергии сигнала от источника излучения. По такой схеме работают, например, адаптивные оптические системы, изображенные на рис. 1.31 и 3.10.

Адаптивные компенсаторы можно использовать для коррекции как погрешностей, обусловленных влияющими факторами (рефракцией воздушных слоев, изменением температуры, вибрациями, изме-

нением нагрузок), так и технологических погрешностей изготовления и сборки элементов оптической системы.

Примером использования адаптивной системы для юстировки и коррекции погрешностей из-за температурных и силовых деформаций может служить схема телескопа с составным зеркалом (рис. 4.59). Здесь юстировка составного зеркала и коррекция погрешностей производится с помощью системы управления элементами, содержа-

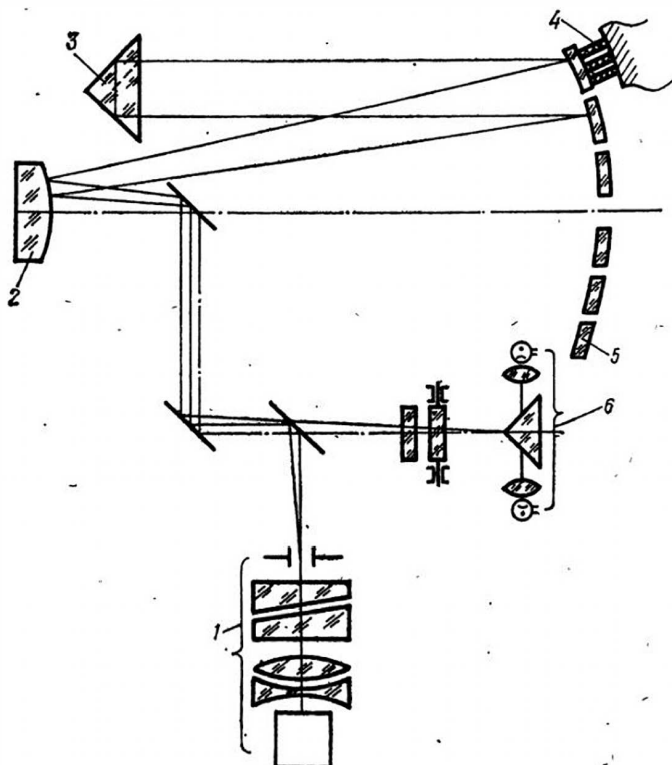


Рис. 4.59. Схема юстировки составного телескопа:

1 — осветитель; 2 — вторичное зеркало; 3 — угловой отражатель; 4 — пьезопривод; 5 — составное главное зеркало; 6 — анализатор

щей осветитель, угловой отражатель, анализатор изображения и систему управления пьезоприводом. Принцип ее работы заключается в том, что лазерным источником освещения, расположенным в фокусе телескопа, и угловым отражателем последовательно освещаются участки поверхностей соседних элементарных зеркал. Свет собирается в исходной точке при отсутствии рассогласования элементов зеркал относительно элемента, являющегося базовым. Анализатор изображения определяет величину этого рассогласования и управляет пьезоприводом контролируемого элемента [24].

В настоящее время адаптивные компенсаторы используют в телескопах и системах лазерной связи главным образом для компенса-

ции влияния турбулентности земной атмосферы, поэтому их управление выполняется с частотой порядка килогерц. Такое быстрое изменение параметров обеспечивают так называемые «гибкие» зеркала, управляемые пьезоэлектрическими приводами либо электростатическим полем.

Гибкими пьезоэлектрическими зеркалами называют такие, поверхность которых изменяется (деформируется) с помощью пьезоэлектрических приводов. Работа этих приводов основана на обрат-

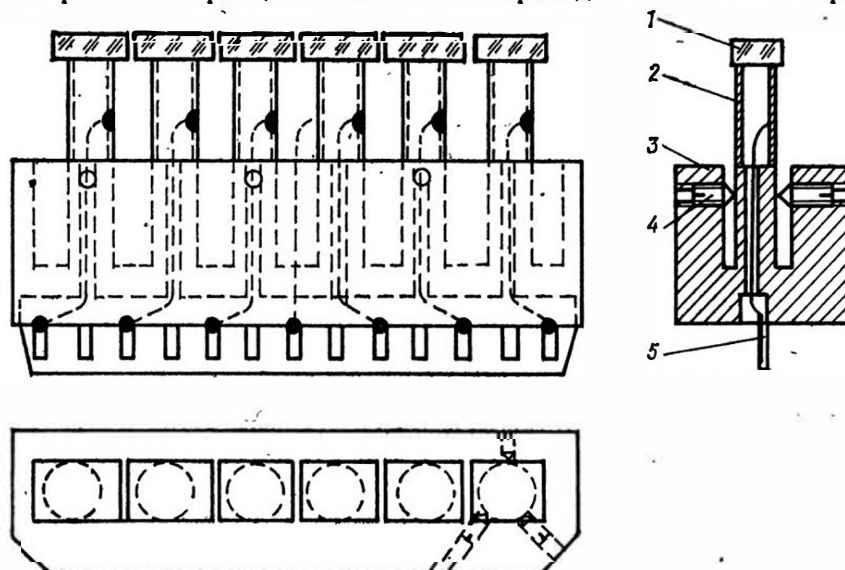


Рис. 4.60. Конструкция составного зеркала:

1 — стеклянное алюминированное зеркало; 2 — цилиндр из пьезокерамики; 3 — основание; 4 — юстировочный винт; 5 — электрод [1, 49]

ном пьезоэлектрическом эффекте — изменении размеров пьезокерамики при подаче на нее электрического напряжения. Известны [1] два типа таких зеркал: составные и монокристаллические. Составное (иногда его называют поршневое) зеркало выполняется из некоторого числа не более 20—30 небольших зеркал, уголкового отражателя или триплекса призм. Каждое из них имеет индивидуальный привод управления. Схематично конструкция одного из таких зеркал, состоящего из шести элементов, представлена на рис. 4.60. Цилиндр 2 изготовлен из пьезоэлектрической керамики ЦТС либо МНС, обладающей большей деформацией и отсутствием гистерезиса по сравнению с ЦТС [60]. Крепление пьезоэлектрических цилиндров к основанию и зеркал к цилиндрам осуществляется приклеиванием эпоксидной смолой.

Коллинеарность и компланарность поверхностей элементарных зеркал обеспечивается их совместной полировкой после приклеивания, либо параллельность — с помощью юстировочных винтов, а компланарность — подачей напряжения смещения на пьезокерамику. Компенсация деформации волнового фронта производится

поступательным (параллельным) перемещением элементарных зеркал пьезоэлектрическими цилиндрами, изменяющими свой размер при подаче на них управляющего напряжения. Каждый цилиндр находится при нейтральном положении в предварительно напряженном состоянии.

В некоторых конструкциях составных зеркал вместо элементарных зеркал используются уголкового отражатели и трипель призмы, позволяющие улучшить некоторые характеристики корректора [59].

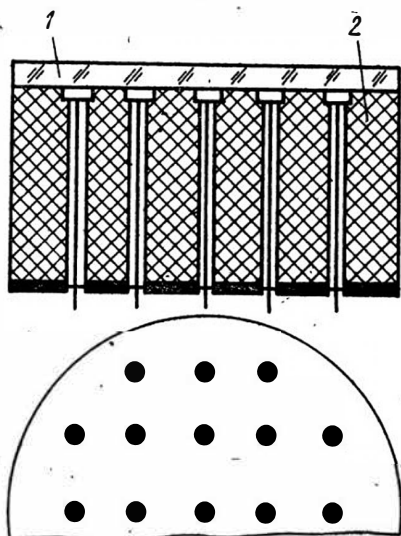


Рис. 4.61. Конструкция монолитного зеркала:

1 — зеркало; 2 — блок пьезоэлектрической керамики [1, 53]

Существуют конструкции составных зеркал, в которых элементарные зеркала наклоняются. Обычно для этого каждое из них имеет три пьезопривода.

Монолитное зеркало выполняют в виде сплошной тонкой отражающей поверхности, соединенной либо с единым блоком пьезоэлектрической керамики, либо с некоторым числом цилиндров, выполненных из пьезоэлектрической керамики. Цилиндры (или единый блок керамики, к которому подсоединена решетка с необходимым числом электродов) осуществляют локальную деформацию отражающей поверхности зеркала. Зеркало изготавливают из стекла, молибдена, бериллия и других материалов, значения коэффициента расширения которых близки к значению коэффициента расширения пьезокерамики.

На рис. 4.61 изображена конструкция монолитного зеркала, имеющего 21 зону локальной деформации. Сплошное алюминированное зеркало приклеено к блоку пьезокерамики, имеющей диаметр 50 мм и толщину 12 мм. На верхней поверхности блока помещена решетка электродов, расположение которых показано на рисунке. К нижней поверхности подсоединен общий электрод.

Прикладывая к решетке биполярные напряжения относительно общего электрода, поверхность зеркала деформируют селективно в зависимости от приложенного напряжения (деформация составляет от долей до нескольких длин волн). Частотная характеристика такого зеркала от 0 до 10 кГц. Влияние зоны локальной деформации на соседние участки зеркала незначительно, что считается преимуществом по сравнению с мембранными адаптивными зеркалами.

На рис. 4.62 представлена схема управления гибким мембранным зеркалом. Отражающим элементом этих зеркал является мембрана, поверхность которой деформируется под действием электростатических полей (приводов). Отражающая мембрана выпол-



нена из титана. Ее толщина составляет обычно 0,5—1,5 мкм, диаметр — до 150 мм. Мембрана помещается между прозрачным и управляющим электродами на расстоянии 50—100 мкм.

Конструкция мембранного зеркала приведена на рис. 4.63. Прозрачный электрод представляет собой токопроводящее покрытие, нанесенное на внутреннюю поверхность защитного окна. К электроду приложено некоторое напряжение смещения  $U_0$ , а к электродам платы  $4 - U_0 \pm U_s$ , где  $U_s$  — управляющее напряжение. При отсутствии напряжения  $U_s$  на управляющих электродах поверхность мембраны плоская (среднеквадратическое отклонение от плоскости не более  $\lambda/20$ ). При подаче управляющего напряжения суммарное усилие, действующее на мембрану, становится отличным от нуля и мембрана деформируется, причем центр деформации локализуется над тем электродом, к которому подано напряжение. Небольшая масса мембраны способствует тому, что управляющее напряжение несколько ниже, чем в пьезоэлектрических зеркалах. Обычно напряжению  $\pm 100$  В соответствует прогиб мембраны  $\pm 0,5\lambda$ .

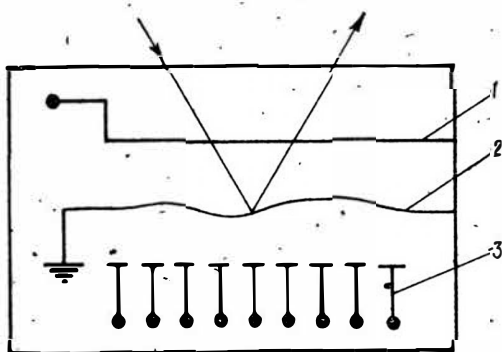


Рис. 4.62. Схема управления гибким мембранным зеркалом

1 — прозрачный электрод; 2 — мембрана; 3 — управляющие электроды

Демпфирование мембраны осуществляется воздушной средой. Управление демпфированием с целью получения наилучших частотных характеристик ( $>5$  кГц) производится посредством изменения давления воздуха между мембраной и электродами. Система управляющих электродов выполнена в виде печатной схемы. Диаметр мембраны равен 50 мм, активная (управляемая) зона расположена на диаметре 25 мм. Количество управляющих электродов на рабочем диаметре равно 53, что объясняется их тесным расположением и исполнением в виде гексагональной решетки.

Для получения наилучших частотных характеристик в конструкции предусмотрено устройство контроля давления. При использовании как пьезоэлектрических, так и мембранных зеркал возникает вопрос о необходимом числе управляющих приводов ( $N$ ), частоте управления ( $BW$ ) и максимальном смещении его элементов (максимальном смещении фазы  $\Delta\varphi_{\max}$ ). В случае компенсации атмосферной турбулентности указанные требования к корректирующему зеркалу можно найти из рекомендаций, изложенных в работе [58]:

$$N = (0,051k^2C_N^2ZD_r^{5/3}/\ln(1/SR))^{6/5};$$

$$BW = 0,65V(k^2C_N^2Z)^{3/5};$$

$$\Delta\varphi_{\max} = 0,57k(C_N^2ZD_r^{5/3})^{1/2},$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  — оптическое волновое число;  $C_N^2$  — постоянная структуры атмосферы;  $Z$  — расстояние распространения излучения;  $D_T$  — диаметр передающей системы;  $SR$  — фактор Штреля (отношение действительной максимальной интенсивности излучения в фокальной плоскости к максимальной интенсивности излучения, ограниченной дифракцией);  $V$  — скорость бокового ветра. Число

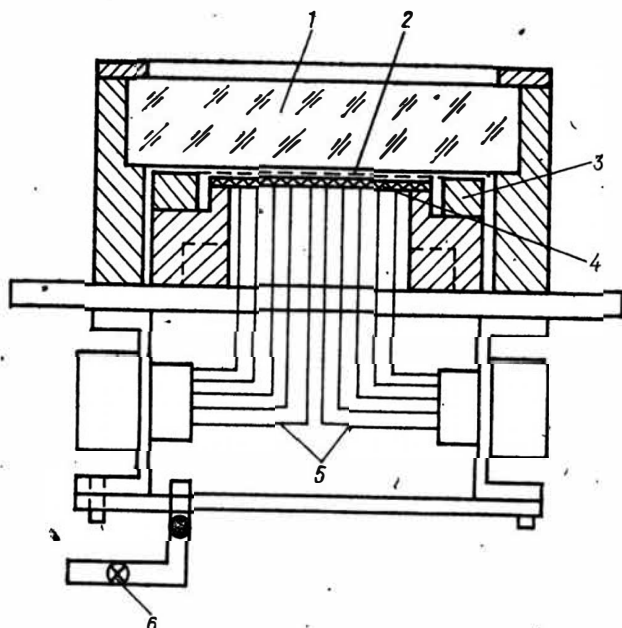


Рис. 4.63. Конструкция гибкого мембранного зеркала:

1 — защитное стекло; 2 — мембрана; 3 — оправа мембраны;  
4 — печатная плата; 5 — кабель; 6 — устройство контроля давления [1, 52]

управляющих приводов можно определить также в соответствии с рекомендациями, изложенными в статье В. Г. Тараненко «Применение активного деформируемого зеркала для коррекции случайных искажений фазового фронта» — ОМП, 1983, № 2.

#### 4.10. КОМПЕНСАТОРЫ ГНУТИЙ ТЕЛЕСКОПОВ

В процессе работы астрономических телескопов возможны появления смещений его элементов относительно друг друга из-за изменения нормальных составляющих сил веса при наблюдении объектов с различными зенитными расстояниями и температурных деформаций. Они приводят, например, к смещению кассеты относительно изображения светила, дифференциальному изгибу (рассогласованию оптических осей) телескопа и гида и т. п. Эти механические и температурные деформации, называемые обычно гнутиями телескопа, существенно ухудшают качество прямых фотографий небесных светил, полевых спектрограмм и фотометрических измерений.

Для компенсации влияния гнутий телескопа в его состав включают специальные устройства — компенсаторы гнутий. На рис. 4.64 приведена схема автоматизированного устройства — компенсатора гнутий, использующегося в телескопе ЗТШ-2,6 м Крымской астрофизической обсерватории АН СССР<sup>1</sup>. Устройство содержит выверочную марку 5, расположенную в фокальной плоскости главного зеркала 6, зеркально-призмный мостик 3, состоящий из плоского зеркала 2 и крышевидной призмы 4, следящую систему 7, 8, 10, 14, сопряженную с гидом, снабженным окулярами 9 и 12, находящимися на едином суппорте. Пучок света от выверочной марки попадает через главное зеркало и призмный мостик на объектив 1 гида, который строит изображение марки в своей фокальной плоскости. В этой плоскости находится также изображение 13 наблюдаемой звезды.

Зеркально-призмный мостик эквивалентен трипелю призмы, поэтому лучи света, выходящие из него, параллельны входящим независимо от пространственных поворотов мостика. В результате любое смещение элементов оптической системы телескопа вызывает смещение изображения выверочной марки в фокальной плоскости гида относительно изображения звезды.

Устранение смещения изображения марки производится с помощью наклонов в двух взаимно перпендикулярных направлениях плоскопараллельной пластинки 14. Изображение звезды в поле зрения телескопа возвращается в исходное положение экспонирования поворотом всего телескопа. Окуляр 9 служит для визуального дублирования модулятора 10 фотоэлектрического канала. Недостатком данного компенсатора гнутий является то, что он конструктивно не сопряжен с выверителем фокусировки (это не позволяет превратить их в единую автоматически работающую систему), а также жесткие требования к точности выполнения двухгранного прямого угла крыши призмы, допуск на который составляет 0,1—0,2" (не должно иметь места двоение изображения выверочной марки, которое вызывает снижение точности работы визуального и фотоэлектрического каналов компенсатора гнутий).

Для устранения недостатков и повышения точности работы сотрудниками ЛОМО им. В. И. Ленина была разработана единая

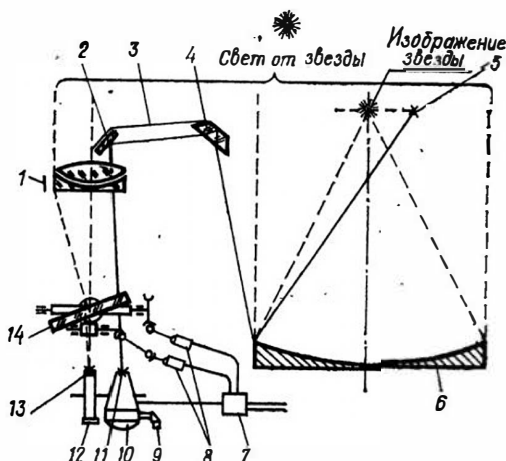


Рис. 4.64. Схема компенсатора гнутий телескопа

<sup>1</sup> А. с. 161537 (СССР).

система для компенсации гнутий и фокусировки телескопа <sup>1</sup>, схема которой была изображена на рис. 4.8. Работа ее при компенсации расфокусировки была описана выше. Рассмотрим, как производится здесь компенсация гнутий телескопа. Канал компенсации гнутий содержит выверочную марку, нанесенную на деталь 4, зеркально-призмный мостик 9, состоящий из призмы с крышей 8 и плоского зеркала 10, плоскопараллельную пластинку 13, которая качается в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью привода 14, фотоприемник 18, подключенный через управляющий усилитель 17 к двигателю привода. При работе телескопа по звезде, ее изображение проектируется зеркалом телескопа (например, на фотопластинку, установленную в его фокусе). Гидирование производится по той же звезде, изображение которой проецируется объективом 11 гида в центр перекрестия визирной сетки окуляра 16 и центр фотоприемника фотогида 15.

Выверочная марка проецируется объективом гида в центр фотоприемника 18. При появлении гнутий телескопа исходная точка экспонирования изображения звезды на фотопластинке сдвигается. Одновременно сдвигается изображение выверочной марки с центра поля фотоприемника 18, что приводит к появлению сигнала рассогласования, управляющего через усилитель приводом качания плоскопараллельной пластинки. Наклонами пластинки изображение вновь приводится в центр фотоприемника, однако при этом будет смещено изображение звезды с центра перекрестия визирной сетки и центра фотоприемника 15 гида.

Поворотом всего телескопа от системы фотоэлектрического или визуального гидирования изображение звезды возвращают в исходное положение. При этом изображение звезды на фотопластинке займет исходную точку экспонирования. Для того чтобы предотвратить взаимное влияние каналов выверителя фокусировки и компенсатора гнутий друг на друга, перед растровыми марками 3, 4 и диссектором 24 установлены поляризаторы 22, 26 (одинакового направления), плоскость поляризации которых перпендикулярная к плоскости поляризаторов 25, 19 (также одинакового направления), установленных перед выверочной маркой и фотоприемником компенсатора гнутий. Для устранения эллиптической поляризации света при отражении в призме в поляризаторы 25, 19 введены компенсирующие пластинки.

Допуск на прямой угол крыши призмы 8 в данной системе расширен благодаря сдвигу входной и выходной диафрагм в разные стороны от ребра крыши.

Еще одним примером системы комплексной компенсации гнутий, расфокусировки и рассогласований элементарных зеркал может служить схема составного телескопа <sup>2</sup>, изображенная на рис. 4.65. Главное зеркало телескопа образовано шестью элементарными зеркалами 5, согласование которых осуществляется с помощью теле-

<sup>1</sup> А. с. 591791 (СССР).

<sup>2</sup> А. с. 940122 (СССР).

скопа согласователя, содержащего шесть трипель-мостиков 8 (конструкция их рассмотрена в предыдущем примере), первичное зеркало согласующего телескопа, нанесенное на внутреннюю поверхность вторичного зеркала 7 телескопа, и вторичное зеркало 9. Компенсатор гнутий содержит выверочную марку (диафрагму) 1,

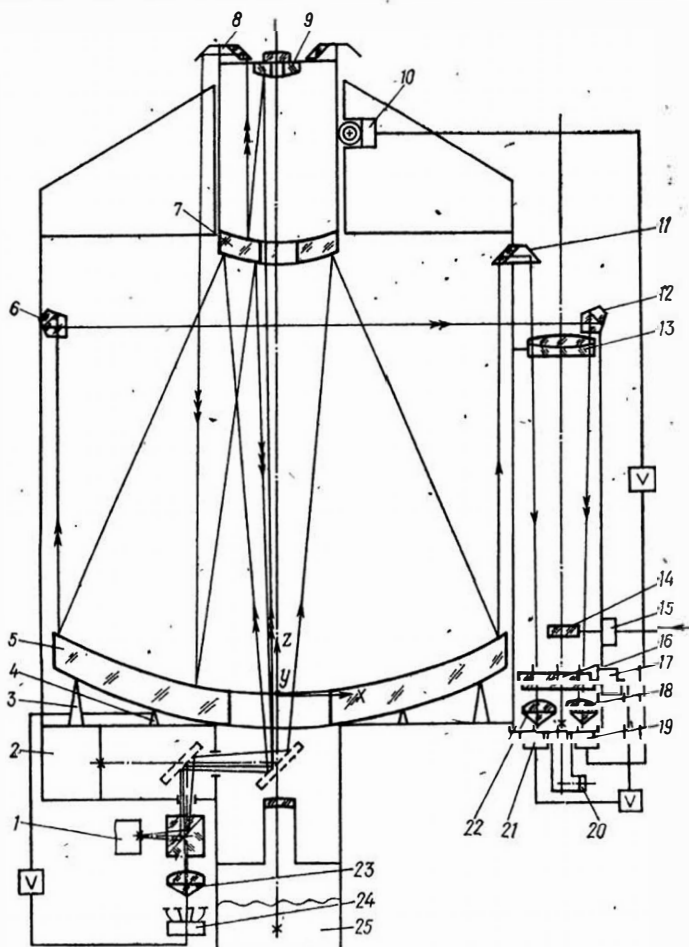


Рис. 4.65: Система согласования элементарных зеркал, компенсации гнутий и расфокусировки составного телескопа

трипель-мостик 11, плоскопараллельную стеклянную пластинку 16, которая качается в двух взаимно перпендикулярных направлениях приводом 17, линзу Фабри с пирамидой 22, квадрантный фотоприемник 21. Выверитель фокусировки содержит марку 1, пентапризмы 6, 12, линзу Фабри с призмой 18, однокоординатный фотоприемник 19, привод 10, производящий фокусировку телескопа осевой подвижкой вторичного зеркала.

Канал согласования элементарных зеркал работает следующим образом. Лучи света (обозначенные на рисунке тремя стрелками) от марки 1, освещаемой лазерным источником и установленной в фокальной плоскости телескопа и телескопа согласования, проходят последовательно телескоп согласователь, триппель-мостики 8, телескоп и попадают на линзу Фабри с пирамидой 23. Линза Фабри и пирамида строят четыре изображения зрачков выхода телескопа, в каждом из которых находятся шесть изображений зрачков выхода системы согласований. Последние переносятся световодами на матрицу из шести квадрантных фотоприемников, причем изображения, построенные отдельным элементом главного зеркала, собираются на соответствующих площадках одного фотоприемника, так чтобы определить направление наклонов зеркала вокруг двух взаимно перпендикулярных осей  $y$ ,  $x$ , приводящих к перераспределению энергии в изображениях зрачков.

Сигналы рассогласования с фотоприемника управляют соответствующими приводами 3, 4 наклонов элементарного зеркала вокруг осей  $y$  и  $x$ . Отсутствие управляющего сигнала соответствует положению зеркала, при котором изображение контрольной марки занимает строго симметричное положение относительно вершины пирамиды. В канале компенсатора гнутый изображение марки 1 (лучи света обозначены одинарной стрелкой) строится телескопом, триппель-мостиком 11 и объективом гида 13 в его фокальной плоскости, где находится линза Фабри с пирамидой. Линза Фабри и пирамида строят четыре изображения зрачка выхода системы компенсации гнутый на соответствующих площадках квадрантного фотоприемника 21. При наличии гнута телескопа изображение марки смещается и происходит перераспределение энергии в изображениях зрачка, что приводит к появлению напряжения, управляющего приводом 17. Привод наклоняет пластинку 16, возвращая изображение марки в исходное положение. При этом в фокальной плоскости объектива гида происходит сдвиг изображения объекта наблюдения (звезды, Луны и т. п.). Поворотом всего телескопа от системы фотоэлектрического или визуального гидирования 20 возвращают изображение объекта в исходное положение. Изображение, образованное главным и вторичным зеркалами телескопа, возвращается в исходную точку на регистраторе сигнала 2. Изображение контрольной марки 1 в канале выверителя фокусировки (лучи света обозначены двойными стрелками) также расположено в фокальной плоскости объектива гида. Линза Фабри с призмой 18 строят два изображения зрачка выхода системы фокусировки на площадках однокоординатного фотоприемника 19.

При появлении расфокусировки происходит перераспределение энергии в изображениях зрачков на фотоприемнике, вызывающее управляющее приводом 10 напряжение. Привод перемещает вторичное зеркало и телескоп-согласователь вдоль оси до момента компенсации расфокусировки. Так как канал расфокусировки чувствителен к гнутям телескопа, то привод коррекции гнута должен иметь скорость отработки сигнала в несколько раз большую скорости

привода фокусировки. Для расширения возможностей телескоп имеет лазерный осветитель объекта наблюдения 25, а его гид — устройство 14, 15 для введения полевых поправок при гидировании от ЭВМ.

## **Г л а в а 5**

### **ТИПОВЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

Для оптических приборов характерным является широкое применение механических функциональных устройств. Они используются в качестве несущих систем, систем настройки и управления прибором, для непосредственного преобразования информативных параметров входного сигнала. Наиболее высокие требования обычно предъявляются к механическим системам последней группы — механизмам и направляющим поступательного и вращательного движения. Рассмотрим компенсаторы погрешностей некоторых наиболее употребительных в оптических приборах элементарных механизмов и направляющих.

#### **5.1. КОМПЕНСАТОРЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ**

Зубчатые передачи используются в оптических приборах и технологическом оборудовании оптического производства для точной передачи углового движения (например, в стереотрубах, панорамах Герца, делительных машинах). Точностными характеристиками зубчатой передачи является кинематическая погрешность — разность между действительным и расчетным углами поворота ведомого колеса и холостое вращение (мертвый ход) ведущего колеса, возникающее при реверсировании движения. В том случае, когда зубчатая передача является отсчетной, стараются уменьшить как кинематическую погрешность, так и мертвый ход, который также приводит к погрешности передачи движения. В зубчатых передачах, используемых в системах точного позиционирования (наведения) и следящих приводах, уменьшают в первую очередь мертвый ход, влияющий на качество выполняемого управления.

Компенсация мертвого хода передачи в случае, когда его значение больше допустимого, осуществляется с помощью силового замыкания, регулировки боковых зазоров и другими известными методами [48], не вызывающими трудностей при их осуществлении.

Трудность компенсации кинематической погрешности обусловлена тем, что она является переменной нерегулярной величиной, имеющей различную амплитуду и фазу в каждой конкретной передаче. На рис. 5.1, а изображен типовой график кинематической по-

грешности ( $\Delta\varphi$ ) зубчатой передачи в функции угла поворота ( $\varphi$ ) ведомого колеса. Как видно из графика, кинематическая погрешность содержит низкочастотную (рис. 5.1, б) и высокочастотную (циклическую) составляющие (рис. 5.1, в). Главными причинами низкочастотной составляющей (синусоидальной гармоники с периодом  $2\pi$ ) является суммарный (геометрический плюс кинематический) эксцентриситет ведомого колеса. Причинами высокочастотной составляющей являются эксцентриситеты ведущих колес (червяков), погрешности шагов и профиля зубьев ведомого и ведущих колес и т. п.

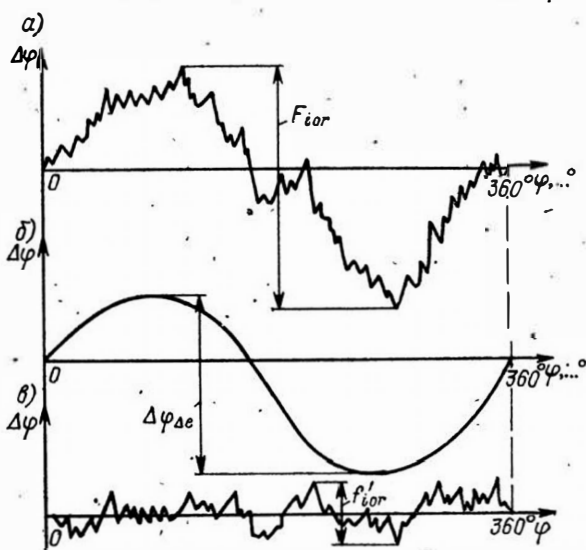


Рис. 5.1. Графики кинематической погрешности зубчатой передачи: а — суммарной погрешности; б, в — низкочастотной и циклической составляющих

Общая суммарная погрешность передачи является результатом суммирования ошибок каждого колеса, передаваемых на выход с преобразованием амплитуд и частот в соответствии с передаточным отношением от конкретного колеса до ведомого, и может быть представлена рядом синусоидальных гармоник, имеющих различную амплитуду ( $A$ ), частоту ( $p$ ) и фазу ( $\theta$ ):

$$\Delta\varphi = \sum_i^n A_i \sin(p_i\varphi + \theta_i). \quad (5.1)$$

Низкочастотная погрешность является доминирующей (обычно она составляет 50—80 % кинематической погрешности передачи) и может быть выражена формулой

$$\Delta\varphi_{\Delta\varepsilon} = [\sin(\varphi + \theta_0) - \sin\theta_0] \Delta\varepsilon_z / (r \cos\alpha), \quad (5.2)$$

где  $\Delta\varepsilon_z$  — величина суммарного эксцентриситета ведомого колеса;  $\varphi$  — угол поворота колеса;  $\theta_0$  — начальная фаза суммарного экс-



центриситета;  $r$  — радиус делительной окружности ведомого колеса;  $\alpha$  — угол зацепления.

Компенсация этой составляющей возможна путем фазовой взаимокompенсации геометрического и кинематического эксцентриситетов, компенсации геометрического эксцентриситета при сборке либо с помощью коррекционных устройств.

Высокочастотная составляющая погрешности передачи, как правило, в несколько раз меньше низкочастотной, поэтому ее компенсируют весьма редко. Компенсация осуществляется с помощью коррекционных устройств, имеющих профильный кулачок [20].

**Взаимокомпенсация влияния геометрического и кинематического эксцентриситетов зубчатого колеса.** Геометрический эксцентриситет возникает за счет смещения зубчатого венца относительно оси посадочного элемента колеса при его изготовлении и сборке. Кинематический эксцентриситет возникает вследствие неравномерности вращения делительного стола зубофрезерного станка, обусловленной эксцентриситетом червячного колеса делительной цепи. Кинематический эксцентриситет для колес, изготовленных на одном станке, может быть найден из выражения

$$\Delta e_k \approx r \Delta e_{\Sigma r} / R, \quad (5.3)$$

где  $R$  — радиус делительной окружности;  $\Delta e_{\Sigma r}$  — эксцентриситет червячного колеса станка.

Погрешность положения<sup>1</sup> колеса от этого эксцентриситета может быть выражена по формуле

$$\Delta \varphi_{\Delta e_k} = [\sin(\varphi + \theta_{0k})] \Delta e_k / (r \cos \alpha). \quad (5.4)$$

где  $\theta_{0k}$  — начальный фазовый угол.

Определим влияние геометрического эксцентриситета колеса на точность его работы. Для этого рассмотрим образование погрешностей положения зубчатого колеса 1, имеющего геометрический эксцентриситет  $\Delta e_r$  при зацеплении его с ведущим колесом 2 (рис. 5.2, а). Примем вращение колеса 1 против часовой стрелки за положительное направление, а по часовой — за отрицательное.

Эксцентриситет приводит к дополнительному повороту колеса против часовой стрелки при контакте по правым и левым профилям на углы:

$$\begin{aligned} \Delta \varphi_{\Pi \Delta e_r} &= \Delta \Pi_{\Delta e_r} / r_0 = \Delta e_r \cos [90^\circ - (\theta_{0r} + \alpha)] / r_0 = \\ &= \sin(\theta_{0r} + \alpha) \Delta e_r / (r \cos \alpha); \\ \Delta \varphi_{\Lambda \Delta e_r} &= \Delta \Lambda_{\Delta e_r} / r_0 = \Delta e_r \cos [90^\circ - (\theta_{0r} - \alpha)] / r_0 = \\ &= \sin(\theta_{0r} - \alpha) \Delta e_r / (r \cos \alpha), \end{aligned} \quad (5.5)$$

где  $\Delta \Pi_{\Delta e_r}$ ,  $\Delta \Lambda_{\Delta e_r}$  — проекции эксцентриситета на правую и левую линии зацепления;  $r_0$ ,  $r$  — радиусы основной и делительной окружности колеса.

<sup>1</sup> Переход от погрешности положения колеса к кинематической погрешности (погрешности перемещения) осуществляется по формуле, аналогичной (5.2).

На рис. 5.2, б изображены графики погрешностей положения колеса в функции фазового угла  $\theta$  при вращении колеса в разные стороны (графики построены без учета влияния бокового зазора). Из формул (5.5) следует, что максимальные значения ошибок положения соответствуют фазовым углам: для левого профиля  $\theta_{\text{л}} = \pi/2 + \alpha$ , для правого —  $\theta_{\text{п}} = \pi/2 - \alpha$ , следовательно, фазы равного влияния геометрического эксцентриситета колеса при различных направле-

ниях движения сдвинуты относительно друг друга на угол:  $\Delta\theta = \theta_{\text{л}} - \theta_{\text{п}} = 2\alpha$ . Заметим, что в работе [41] приводится ошибочный результат:  $\Delta\theta = \pi - 2\alpha$ , причиной которого является неправильный выбор системы отсчета для ошибок положения колеса.

Из выражений (5.4) и (5.5) видно, что погрешности, обусловленные кинематическим и геометрическим эксцентриситетами колеса, имеют одинаковый период, следовательно, возможна их фазовая взаимокомпенсация соответствующим изменением  $\theta_{0\Gamma}$  (либо  $\theta_{0\kappa}$ ). Учитывая, что угловая погрешность положения колеса от геометрического эксцентриситета имеет сдвиг фаз равного влияния на  $2\alpha$  по левым и правым профилям, а для кинематического эксцентриситета сдвиг фаз отсутствует, наимыгод-

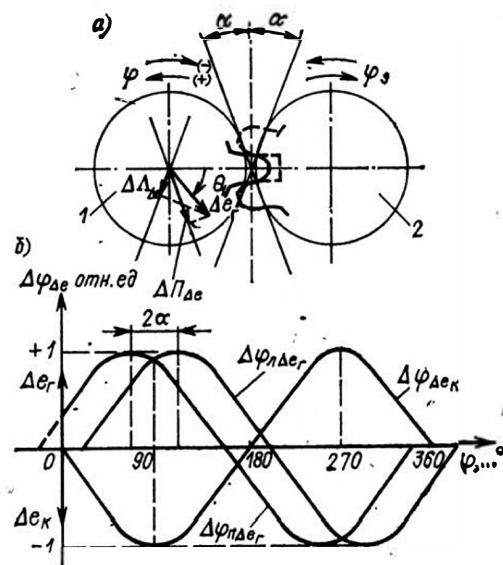


Рис. 5.2. Взаимокомпенсация влияний геометрического и кинематического эксцентриситетов колес ( $\Delta\varphi_{\text{л}} \Delta e_{\Gamma}$ ,  $\Delta\varphi_{\text{п}} \Delta e_{\Gamma}$  — погрешности положения колеса из-за геометрического эксцентриситета по левому и правому профилям;  $\Delta\varphi_{\text{дек}}$  — погрешность из-за кинематического эксцентриситета)

нейшим для передач, работающих в отсчетном режиме при обоих направлениях движения, является прямо противоположное направление векторов геометрического и кинематического эксцентриситетов (см. рис. 5.2, б). При этом происходит взаимокомпенсация влияния эксцентриситетов на погрешность положения (и стало быть и кинематическую погрешность) при любых их численных значениях, достигающая минимума недокомпенсации при  $\Delta e_{\Gamma} = \Delta e_{\kappa} \cos \alpha$ , т. е. практически при равенстве эксцентриситетов. Значение недокомпенсации для левого (л) и правого (п) профиля одинакова и может быть найдена из выражений (5.4) и (5.5):

$$\Delta\varphi_{\text{нк. п. л}}^I = \Delta\varphi_{\Delta e_{\Gamma}} - \Delta\varphi_{\Delta e_{\kappa}} = \frac{1}{r \cos \alpha} \sqrt{\Delta e_{\Gamma}^2 + \Delta e_{\kappa}^2 - 2 \Delta e_{\Gamma} \Delta e_{\kappa} \cos \alpha} \times \sin \left[ \varphi + \theta_0 + \arctg \left( \frac{\Delta e_{\Gamma} \sin (\pm \alpha)}{\Delta e_{\Gamma} \cos \alpha + \Delta e_{\kappa}} \right) \right]. \quad (5.6)$$

При  $\Delta e_r = \Delta e_k = \Delta e$

$$\Delta \varphi_{\text{нк. п. л}}^{\text{II}} = 2 \Delta e \sin(\alpha/2) \cos(\varphi + \theta_0 \pm \alpha/2)/(r \cos \alpha). \quad (5.7)$$

Заметим, что самый неблагоприятный случай наблюдается тогда, когда эксцентриситеты направлены либо в одну сторону либо их направление отличается на  $\pm \alpha$

$$\Delta \varphi_{\Sigma \text{ п. л}}^{\text{III}} = \Delta \varphi_{\Delta e_r} + \Delta \varphi_{\Delta e_k} = \frac{1}{r \cos \alpha} \sqrt{\Delta e_r^2 + \Delta e_k^2 + 2 \Delta e_r \Delta e_k \cos \alpha} \times \\ \times \sin \left[ \varphi + \theta_0 + \arctg \left( \frac{\Delta e_r \sin(\pm \alpha)}{\Delta e_r \cos \alpha + \Delta e_k} \right) \right]. \quad (5.8)$$

При  $\Delta e_r = \Delta e_k = \Delta e$

$$\Delta \varphi_{\Sigma \text{ п. л}}^{\text{IV}} = 2 \Delta e \cos(\alpha/2) \sin(\varphi + \theta_0 \pm \alpha/2)/(r \cos \alpha). \quad (5.9)$$

В случае, когда  $\theta_{0\text{к}} = \theta_{0\text{р}} + \alpha$ , имеем:

$$\Delta \varphi_{\Sigma \text{ п}}^{\text{V}} = \sqrt{\Delta e_r^2 + \Delta e_k^2 + 2 \Delta e_r \Delta e_k \sin(\varphi + \theta_{0\text{р}} + \alpha)/(r \cos \alpha)}; \quad (5.10)$$

$$\Delta \varphi_{\Sigma \text{ л}}^{\text{VI}} = \frac{1}{r \cos \alpha} \sqrt{\Delta e_r^2 + \Delta e_k^2 + 2 \Delta e_r \Delta e_k \cos 2\alpha} \times \\ \times \sin \left[ \varphi + \theta_{0\text{р}} + \arctg \left( \frac{\Delta e_k - \Delta e_r}{\Delta e_k + \Delta e_r} \operatorname{tg} \alpha \right) \right]. \quad (5.11)$$

При  $\Delta e_r = \Delta e_k = \Delta e$

$$\Delta \varphi_{\Sigma \text{ п}}^{\text{VII}} = 2 \Delta e \sin(\varphi + \theta_{0\text{р}} + \alpha)/(r \cos \alpha); \quad (5.12)$$

$$\Delta \varphi_{\Sigma \text{ л}}^{\text{VIII}} = 2 \Delta e \sin(\varphi + \theta_{0\text{р}})/r. \quad (5.13)$$

Сравнение выражений (5.6) и (5.7) с (5.8), (5.9), либо с (5.10)–(5.13) показывает, что в случае, когда возможно регулирование направления, например, геометрического эксцентриситета, угловая погрешность колеса может быть существенно уменьшена.

При  $\Delta e_r = \Delta e_k$  из выражений (5.7) и (5.12) получаем уменьшение погрешности в  $K$  раз:

$$K = \Delta \varphi_{\Sigma \text{ п}}^{\text{VII}} / \Delta \varphi_{\text{нк. п. л}}^{\text{II}} = 1/\sin(\alpha/2) \approx 5,5.$$

Для зубчатых передач, работающих в отсчетном режиме при одно-стороннем движении, выгоднее направлять векторы геометрического и кинематического эксцентриситетов под углом  $180 \pm \alpha$  друг к другу в зависимости от того, какой профиль колеса работает в отсчетном режиме (правый или левый). В этом случае для рабочего профиля при  $\Delta e_r = \Delta e_k$  будет полная взаимокompенсация ( $\Delta \varphi_{\text{нк}} = 0$ ).

Практическая реализация взаимокompенсации может быть осуществлена путем регулирования положения заготовки колеса на столе станка перед нарезанием зубьев. Для этого заготовку нужно смещать за счет зазора в посадке или с помощью специального патрона в сторону, противоположную кинематическому эксцентриситету [41] (направление которого для станка должно быть известным) на величину, которая определяется из выражения (5.3). Следует учесть, что при такой реализации способа компенсации желательно

отсутствие геометрического эксцентриситета, возникающего при монтаже колеса.

Взаимокомпенсацию можно осуществить и при сборке колеса, направляя суммарный геометрический эксцентриситет (от эксцентриситетов колеса и монтажа) по отношению к направлению кинематического эксцентриситета в соответствии с вышеизложенными рекомендациями. Для этого нужно знать направление и численные зна-

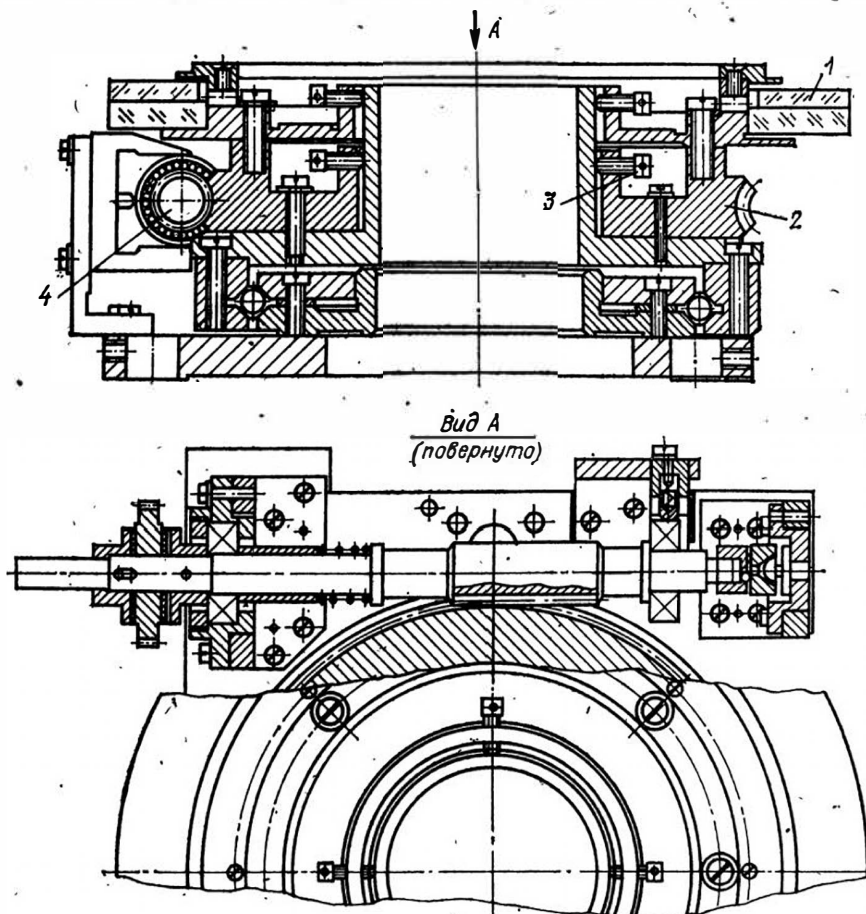


Рис. 5.3. Отсчетная система гониометрического устройства

чения  $\Delta e_r$  и  $\Delta e_t$ , которые можно получить при контроле погрешности обката ( $F_c$ ) колеса и радиального биения зубчатого венца. Конструкция крепления зубчатого колеса на оси должна позволять изменять численное значение и направление  $\Delta e_r$ .

**Компенсация центрированием и разворотом зубчатых колес.** Если зубчатые колеса изготавливают на станке, имеющем высокую точность привода, главной причиной низкочастотной составляющей кинематической погрешности таких колес будет их геометрический

эксцентриситет. В этом случае повышение точности зубчатой передачи может быть достигнуто путем центрирования колес относительно осей их вращения во время сборки. Так как на точность зубчатой передачи, работающей на замедление (типовой случай), основное влияние оказывает погрешность последней пары, то обычно в передаче устраняют радиальное биение зубчатого венца только ведомого колеса.

На рис. 5.3 изображен узел отсчетной системы гониометрического устройства, в котором лимб 1 поворачивается с помощью червячного

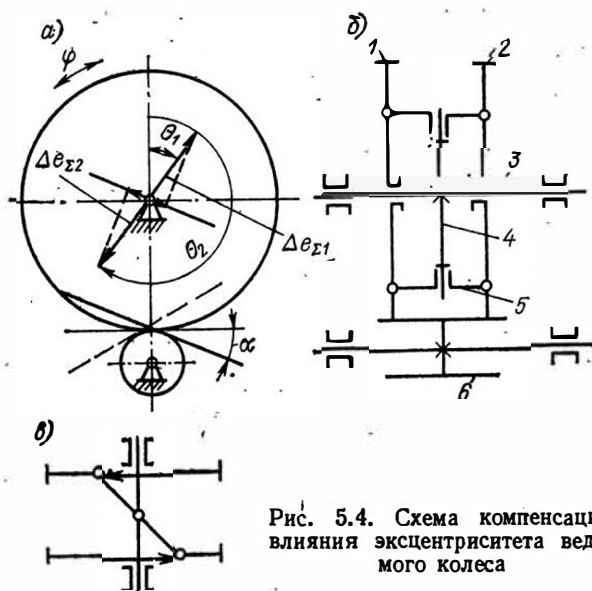


Рис. 5.4. Схема компенсации влияния эксцентриситета ведомого колеса

колеса 2 и червяка 4, являющихся последней парой зубчатой передачи. Здесь для повышения точности и плавности движения винтами 3 при сборке производят центрирование червячного колеса относительно оси вращения, замеряя биение его зубчатого венца с помощью микронного индикатора. В данной конструкции предусмотрена также возможность регулировки червяка по червячному колесу, выборка бокового и осевого зазоров червяка.

Другой метод компенсации основан на том, что зубчатое колесо изготавливают из двух одинаковых частей (путем разрезания или нарезания зубьев одновременно на двух заготовках), которые разворачиваются относительно друг друга на  $180^\circ$ . Тогда суммарный эксцентриситет  $\Delta e_{\Sigma}$  одной половины колеса, равный суммарному эксцентриситету второй половины (рис. 5.4, а), будет направлен противоположно ему, что вызовет равные, но разные по знаку их развороты:

$$\Delta \varphi_1 \Delta e_{\Sigma} = \Delta e_{\Sigma} [\sin (\varphi + \theta_{01} \pm \alpha) / (r \cos \alpha)];$$

$$\Delta \varphi_2 \Delta e_{\Sigma} = \Delta e_{\Sigma} [\sin (\varphi + \theta_{01} + \pi \pm \alpha) / (r \cos \alpha)].$$

Выполнив соединение половин колеса с ведомым валом 3 через водило 4 (рис. 5.4, б) и средник 5, который соединен шарнирно с колесами и может разворачиваться вокруг водила, получаем взаимокompенсацию влияния разворотов половин колес из-за влияния их эксцентриситета (рис. 5.4, в). Это происходит потому, что средник поворачивается вокруг водила и не передает на него угловых погрешностей половин колес. Движение же колес 1 и 2 (имеющее одинаковый знак) от ведущего колеса 6 передается через средник на водило и через него на ведомый вал.

Конструктивно (рис. 5.5) данная схема может быть выполнена для передачи, работающих с небольшими моментами нагрузки, с водилом 1 в виде упругой плоской пружины и жестко соединенным с ней

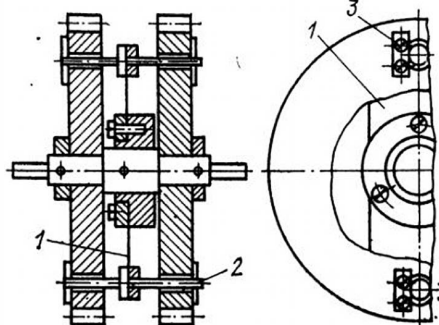


Рис. 5.5. Зубчатое колесо с компенсацией влияния эксцентриситета

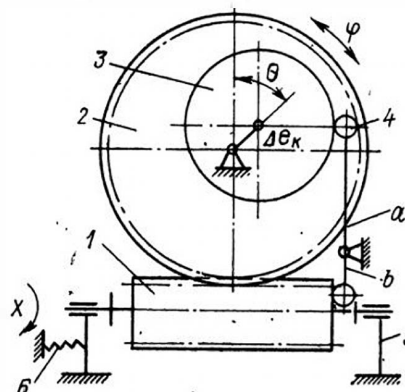


Рис. 5.6. Схема коррекционного устройства червячной передачи

средником 2 в виде цилиндрического штифта, опирающегося на ножевидные упоры 3 колес.

**Коррекционные устройства.** Одно из первых коррекционных устройств, применяемых в оптических приборах, было предложено С. Т. Цуккерманом [46] для компенсации влияния эксцентриситета червячного колеса стереотрубы (см. рис. 1.29). Коррекция проводится дополнительными поворотами червяка при синусоидальном поправочном покачивании индекса отсчетной шкалы с помощью наклонной шайбы (или эксцентрика), установленной на оси червячного колеса. Подобные устройства применяют также в некоторых моделях поворотных столов и делительных головках. В том случае, когда червячная передача работает в автоматическом режиме, коррекционные устройства основаны обычно на осевом смещении червяка. Схема одного из таких устройств изображена на рис. 5.6. Она содержит червяк 1, косозубое (червячное) колесо 2, двойной эксцентрик (кулачок 3) с регулируемым направлением ( $\theta_n$  от 0 до 360°) и эксцентриситетом ( $\Delta e_n$ ), рычажную передачу 4, направляющую 5 для вращательного и поступательного движения червяка, пружину 6, предназначенную для силового замыкания червяка и рычажной передачи на эксцентрик.

При повороте червячного колеса поворачивается закрепленный на одной с ним оси эксцентрик, сообщающий через рычаг корректировочное движение червяку. Корректировочное устройство работает по следующей зависимости:

$$\Delta\varphi_k = (\sin\theta - \sin\theta_n) \Delta e_k b / (ar), \quad (5.14)$$

где  $\varphi$  — угол поворота червячного колеса;  $\theta = \varphi + \theta_n$  — текущие направления эксцентриситета;  $\theta_n$  — начальное (при  $\varphi = 0$ ) направление эксцентриситета;  $a$ ,  $b$  — плечи рычага;  $r$  — радиус делительной окружности червячного колеса.

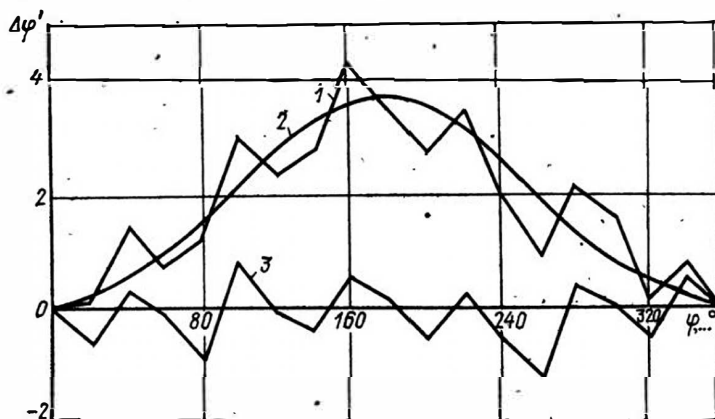


Рис. 5.7. Графики кинематической погрешности червячной передачи:

1 — суммарная погрешность без коррекционного устройства; 2 — составляющая погрешности, обусловленная эксцентриситетом колеса; 3 — суммарная погрешность после коррекции

При настройке коррекционного устройства добиваются, чтобы  $\Delta\varphi_k = -\Delta\varphi_{\Delta e_{\Sigma}}$ , что обеспечивается регулировкой величин  $\Delta e_k$  и  $\theta_n$ .

Для этого, отключив коррекционное устройство, измеряют кинематическую погрешность передачи и выявляют по ее графику (либо с помощью гармонического анализа) первую гармонику, обусловленную суммарным эксцентриситетом червячного колеса. Для выявления этой составляющей не требуется большого количества точек контроля на оборот ведомого колеса (обычно 12—36), что позволяет применять для контроля простейшие кинематомеры или углоизмерительные головки. На рис. 5.7 изображен график кинематической погрешности (1) подобной передачи с червяком, имеющим число заходов 1, модуль  $m = 1$  и косозубым колесом с числом зубьев  $z = 150$ . Выявив по нему низкочастотную составляющую (2) и определив  $\Delta\varphi_{\Delta e_{\Sigma}}$ , найдем из формулы (5.14) необходимое значение  $\Delta e_k$  (при  $b = 10$  мм,  $a = 65$  мм,  $\Delta e_k \approx 0,29$  мм). Вычисленное значение  $\Delta e_k$  устанавливается на двойном эксцентрике разворотом с последующей фиксацией наружного эксцентрика относительно внутреннего. Значения эксцентриситетов внутреннего и наружного эксцентриков ( $\Delta e$ ) равны, поэтому  $\Delta e_k$  может регулироваться от 0 до  $2 \Delta e$ . Кон-

троль величины (и направления  $\Delta e_n$ ) производится, например, с помощью индикатора. Необходимое значение  $\theta_n$  для создания  $\Delta \varphi_n$  обратного знака к  $\Delta \varphi_{\Delta e_\Sigma}$  находится по формуле (5.14), либо по виду  $\Delta \varphi_n$  при задании некоторого  $\theta_n$  (обычно задают  $\theta_n = 0, 90, 180, 270^\circ$  — в зависимости от того, какое  $\Delta \varphi_n$  при этом будет ближе к требуемому, а затем окончательно корректируют  $\theta_n$ ). Установка  $\theta_n$  производится разворотом всего эксцентрика относительно оси червячного колеса.

При правильном определении и установке  $\Delta e_n$  и  $\theta_n$  коррекционное устройство практически полностью компенсирует низкочастотную составляющую кинематической погрешности передачи (линия 3

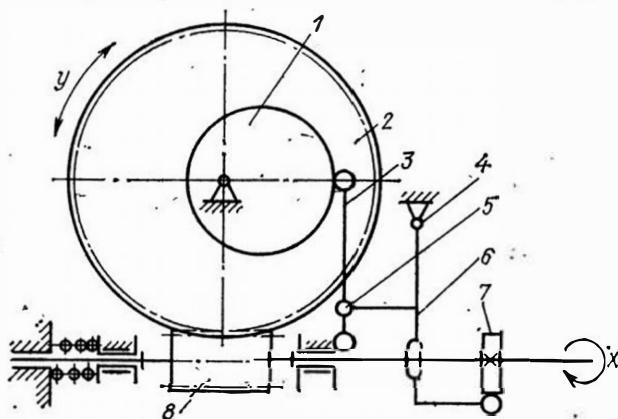


Рис. 5.8. Схема коррекционного устройства зубофрезерного станка

на рис. 5.7). Наличие коррекционного устройства позволяет уменьшать кинематическую погрешность передачи более, чем в два раза.

Для компенсации и циклической составляющей, что характерно для передач прецизионных делительных машин и зубонарезных станков, кулачок профилируют в функции измеренной кинематической погрешности. Число точек контроля погрешности и профилировки кулачка при этом достигает, как правило, нескольких сотен, что требует использования для этих целей автоматизированных кинематомеров и станков для автоматической обработки кулачков [20].

На рис. 5.8 представлена схема коррекционного устройства зубофрезерного станка [20], содержащего профилированный кулачок 1, предназначенный для компенсации низкочастотных погрешностей червячной передачи 2, 8 и профилированный кулачок 7, компенсирующий циклические погрешности червяка. Коррекционное смещение червяка 8 в направляющих происходит здесь при повороте двуплечего рычага 3 вокруг шарнира 5 от кулачка 1 и при смещении шарнира при повороте рычага 6 вокруг оси 4 от кулачка 7. При компенсации влияния только эксцентриситетов колеса и червяка кулачки 1 и 7 могут быть выполнены в виде эксцентриков.



В особо точных машинах и станках применяют корректирующие устройства, учитывающие также эксплуатационные погрешности передачи. Они являются замкнутой следящей системой, встроенной в станок и содержащей устройство измерения кинематической погрешности (кинематомер или эталонные элементы), устройство управления и исполнительный орган, компенсирующий выявленные погрешности [20, 44].

## 5.2. КОМПЕНСАТОРЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ

Винтовые механизмы находят широкое применение в оптических приборах. Их используют как в отсчетных передачах (окулярных и оптических микрометрах, спектральных приборах, делительных машинах), так и в устройствах управления (механизмах фокусировки, наведения на объект) преимущественно для преобразования вращательного движения (винта) в поступательное

$$y = npx/(2\pi), \quad (5.15)$$

где  $y$  — перемещение гайки или конца винта для винтового механизма I рода;  $n$  — число заходов;  $p$  — шаг резьбы;  $x$  — угол поворота винта.

Погрешность функционирования винтового механизма обусловлена следующими причинами:

погрешностью шага резьбы винта ( $\Delta p$ ) —  $\Delta y_{\Delta p} \approx \Delta p$ ;

осевым зазором ( $\Delta c_o$ ) в резьбовом соединении винта и гайки —  $\Delta y_{\Delta c_o} \approx \Delta c_o$ ;

осевым биением ( $\Delta p_o$ ) винта в опорах вращения (винтовой механизм II рода) —  $\Delta y_{\Delta p_o} = \Delta p_o$ .

Погрешность шага гайки оказывает гораздо меньшее влияние на точность работы, к тому же гайка может быть выполнена открытой, не охватывающей полностью винт по окружности (например, в виде сегмента), либо контактировать с профилем резьбы винта по точке. Одним из конструктивных решений является выполнение винтовой пары с винтом, имеющим трапецеидальный, а гайки — прямоугольный профиль, и контактирующих друг с другом по среднему диаметру резьбы.

Все эти погрешности приводят, кроме потерь точности, также к недостаточной чувствительности и трудностям при управлении устройствами, что требует их компенсации в прецизионных приборах и машинах.

Компенсация осевого зазора осуществляется обычно с помощью силового замыкания гайки на левый или правый профиль резьбы винта; регулировкой зазора с помощью цанговой или разрезной гайки; притиркой или упругим обжатием резьбы винта гайкой, выполненной из полиэтилена или фторопласта, и другими известными методами [37, 48]. Необходимо иметь в виду, что зазоровыбирающие устройства увеличивают трение в резьбовом соединении и ускоряют его износ. Это требует периодического контроля и подрегулировки

компенсатора (иногда повторной притирки гайки к винту), использования сочетаний материалов, обладающих низким коэффициентом трения и хорошей приработкой (сталь — оловянистая бронза, баббит, полиэтилен, фторопласт). Как показали исследования, наилучшие результаты достигаются при применении гаек открытого типа с дальнейшей передачей движения перемещаемому звену (кадетке) через пару высшего класса (шарик).

Компенсация осевого биения ходового винта осуществляется обычно его силовым замыканием (с помощью пружин, грузами, либо регулировкой) на шаровую опору (см. рис. 5.9). При этом опорная площадка винта 1 не должна иметь торцевого биения отно-

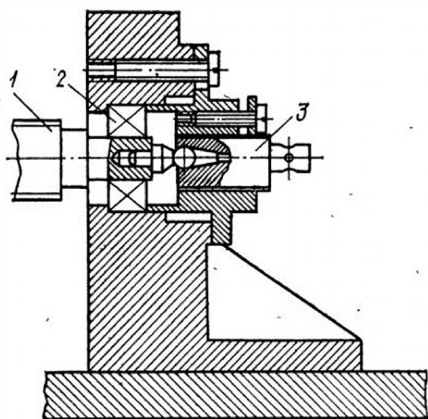


Рис. 5.9. Шаровая опора винта

сительно оси вращения, что обеспечивается ее шлифовкой и полировкой совместно с цапфами под подшипник, либо при вращении вокруг цапф. Площадка выполняется из закаленной стали, агата, корунда, рубина или сапфира. Полированный шарик в регулируемой шаровой опоре 3 закреплен неподвижно, и его центр должен находиться на оси вращения винта. Подшипники 2 (либо цапфы в случае опор скольжения) должны иметь минимальное радиальное биение, иначе это приведет к перекосу опорной площадки и осевому

смещению винта. Кроме этого, радиальное биение приводит к погрешности перемещения гайки. Перекос опорной площадки ( $\Delta\gamma$ ) является взаимосвязанной погрешностью с несросностью ( $\Delta\epsilon$ ) шарика с осью вращения винта и вызывает осевое его смещение

$$\Delta y_{\Delta\gamma, \Delta\epsilon} = (\cos \theta_{\tau} - \cos \theta_n) \Delta\epsilon \Delta\gamma,$$

где  $\theta_{\tau}$ ,  $\theta_n$  — текущее и начальное значения угла, определяющего направление перекоса площадки соответственно. За один оборот винта эта периодическая погрешность изменяется от 0 до максимального значения, равного  $2 \Delta\epsilon \Delta\gamma$ .

Радиальное биение ( $\Delta\rho$ ) цапф в подшипниках приводит к погрешности  $\Delta y_{\Delta\rho} \approx \Delta\rho^2/L$ , где  $L$  — расстояние от площадки до мгновенного центра поворота. Погрешность перемещения гайки из-за радиального биения винта  $\Delta y_{\Delta\rho} = 2 \Delta\rho \operatorname{tg}(\alpha/2)$ .

Компенсация погрешности шага винта является более сложной задачей, что обусловлено переменным нерегулярным характером погрешности, содержащей накопленную (1), периодическую (2) и циклическую (3) составляющие (рис. 5.10). Она осуществляется корректировочным поворотом гайки, винта или осевым перемеще-

нием винта. Корректировочное движение производится с помощью коррекционных линеек, кулачков или следящих устройств.

**Компенсация погрешностей с помощью коррекционных линеек и кулачков.** На рис. 5.11 изображена схема винтового механизма с компенсацией погрешности шага с помощью коррекционной линейки. Линейка 1 устанавливается в положения I или II. В положении II по линейке скользит рычаг, соединенный с гайкой 2. Так как линейка повернута на коррекционный угол  $\Delta\gamma_K$ , то гайка получает дополнительное перемещение ( $\Delta y_K$ ) при повороте винта 3 на некоторый угол  $x$  (вводимый, например, по шкале 4 и неподвижному индексу 5):  $\Delta y_K \approx (np/2\pi)^2 \times x \Delta\gamma_K/R_1$ . При этом компенсируется накопленная составляющая (линия 1 на рис. 5.10) погрешности винтовой пары. Для компенсации периодической погрешности линейку профилируют.

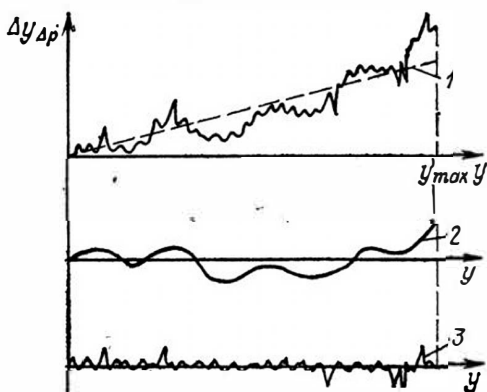


Рис. 5.10. Графики погрешности шага винта

При установке коррекционной линейки на гайку (положение I) на нее замыкают двуплечий рычаг 6, производящий коррекционный поворот индекса 5, который выполнен подвижным. В результате винт поворачивается на дополнительный угол  $\Delta\gamma_K$ .

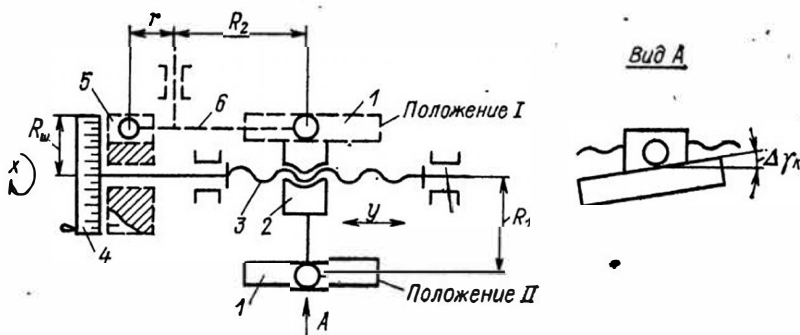
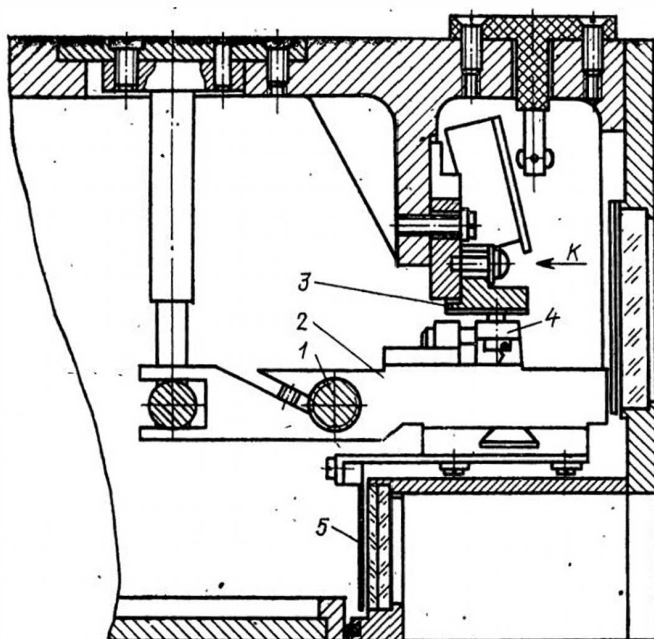


Рис. 5.11. Схема компенсации погрешности шага винта коррекционной линейкой

что приводит к коррекционному перемещению гайки:  $\Delta y_K \approx r (np/2\pi)^2 \Delta\gamma_K x / (R_2 R_m)$ .

На рис. 5.12 представлена конструкция оптического отсчетного устройства координатно-расточного станка с коррекцией погрешности работы отсчетного винта 1 и гайки 2 с помощью коррекционной линейки 3. Коррекционная линейка выполнена в виде тонкой упругой пластины (ленты), которая деформируется при сборке подвижкой



*Вид К (увеличено)*

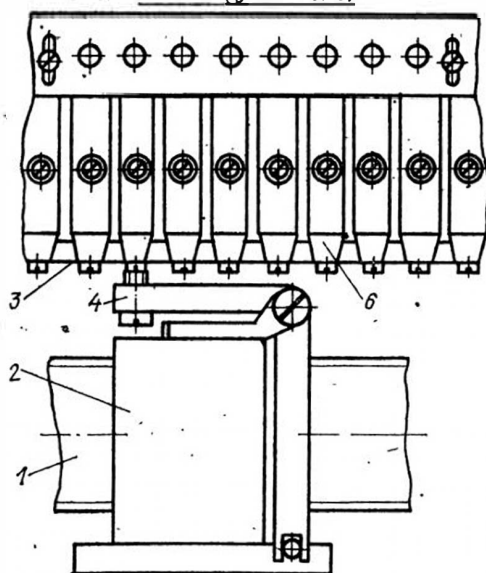


Рис. 5.12. Отсчетное устройство

угольников 6 по конкретным значениям погрешности винтовой пары, что дает возможность компенсировать не только ее накопленную, но и периодические составляющие. В результате при перемещении гайки с закрепленным на ней щупом 4 в виде двуплечего рычага последний передает корректировочное смещение индексу 5, установленному на гайке в направляющих типа «ласточкин хвост».

Работу коррекционного устройства на основе кулачка рассмотрим на примере упрощенной кинематической схемы прибора ИГ-114 для определения оптических констант стекол (рис. 5.13). Здесь отсчетный поворот стола 9 осуществляется от двигателя 1 с помощью зубчатых передач 2, 4, винтового механизма 6, 7 и ленточной передачи 8. Угол поворота стола определяется с помощью фотоэлектри-

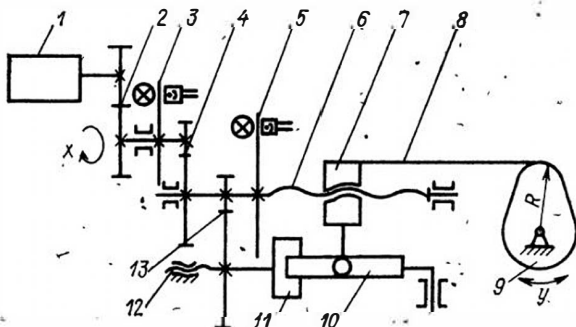


Рис. 5.13. Кинематическая схема прибора ИГ-114

ческих датчиков с дисками 3, 5. На точность работы этого привода основное влияние оказывает погрешность винтовой пары. Для компенсации этой погрешности, а также погрешностей зубчатой передачи 4, радиуса стола (рычага  $R$ ) и погрешности деления диска 5 предусмотрен коррекционный кулачок 11. Коррекционный кулачок, совершая вращательное и поступательное движения от зубчатой пары 13 и винтовой пары 12, качает опирающуюся на него линейку 10. В результате ходовая гайка 7, скользя по полированной линейке 10 (выполненной из стекла), поворачивается вокруг винта 6 и получает дополнительное коррекционное перемещение. Профилировка кулачка осуществляется по суммарной кинематической погрешности привода прибора, измеренной для каждого деления диска 5.

**Компенсация с помощью следящих устройств.** Механические коррекционные устройства обычно позволяют снизить погрешность винтовой пары до десятых долей микрона (в лучшем случае) и предназначены, как правило, для компенсации ее технологических погрешностей. Когда требуется более высокая точность коррекции и компенсация эксплуатационных погрешностей, применяют коррекционные устройства, основанные на использовании измерительных следящих систем. Они содержат измерительное устройство, устройство управления и исполнительный привод.

Измерительное устройство предназначено для точного измерения перемещения каретки (гайки) винтового механизма с помощью дат-

чиков линейного перемещения, основанных на дифракционных решетках, интерферометре Майкельсона, индуктивных преобразователях. Устройство управления вырабатывает сигнал рассогласования либо командный сигнал с программного устройства, управляющий исполнительным приводом, в качестве которого обычно ис-

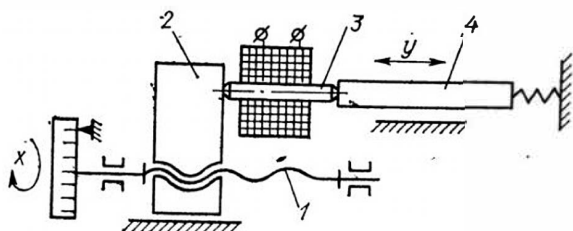


Рис. 5.14. Схема коррекционного устройства винтовой передачи магнитострикционным приводом

пользуют магнитострикционный, пьезокерамический приводы или приводы с шаговым и другими электродвигателями.

На рис. 5.14 изображена схема винтовой передачи с коррекцией ее погрешности с помощью следящего устройства, содержащего магнитострикционный привод [44]. Отсчетный поворот винта 1 пере-

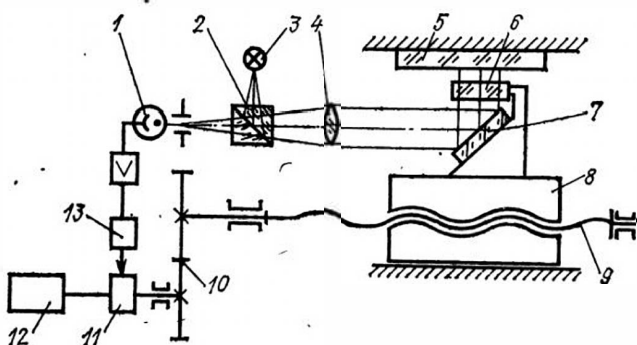


Рис. 5.15. Схема управления приводом машины для нарезания дифракционных решеток

дается на смещение стола 4 через гайку 2 и сердечник 3 магнитострикционного привода. Сердечник выполнен из ферромагнитного материала, размеры которого изменяются при колебании магнитного поля катушки. Катушка привода работает от измерительного и управляющего устройств либо программного устройства, в которое занесены данные о технологических погрешностях и влияющих факторах.

По такой схеме может быть построено коррекционное устройство с пьезокерамическим приводом. Отличие его состоит в том, что перемещение гайки передается на стол через столбик из пьезокерамики, изменяющий свои размеры при подаче на него управляющего напряжения.

Другим способом уменьшения влияния погрешности винтовой пары на точность функционирования устройства является перевод пары из отсчетной в неотсчетную, т. е. использование ее только в качестве привода [36]. Такое решение применяется, например, в машинах для нарезания дифракционных решеток (рис. 5.15). Отсчетное перемещение стола 8, несущего заготовку, измеряется с помощью интерференционного датчика линейных перемещений 1—7 [35], содержащего подвижную, установленную на столе, прозрачную дифракционную решетку 6 и неподвижную отражающую дифракционную решетку 5. При смещении подвижной решетки относительно неподвижной возникающие муаровые интерференционные полосы, имеющие определенную цену деления, подсчитываются счетчиком 13, который управляет тормозом и электромагнитной муфтой 11, разъединяющей двигатель 12 с зубчатым (червячным) 10 и винтовым 8, 9 приводами. Машины подобного типа, имеющие плавный привод, что обеспечивается рациональным конструированием их привода, использованием таких материалов как стекло, фторопласт, бакаут, доводкой кинематических пар, и соответствующие условия эксплуатации, позволяют достигать точности до десятых долей микрона.

### 5.3. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рычажные механизмы благодаря своей конструктивной простоте, технологичности, надежности и компактности используются во многих оптических приборах. С их помощью производится передача и преобразование угловых и линейных движений как в измерительных функциональных устройствах приборов (например, в оптиметрах, спектральных приборах, дальномерах), так и в устройствах управления (фокусирующие устройства микроскопов, устройства наведения теодолитов). В подавляющем большинстве это плоские одноплечие, выполненные по синусной или тангенсной схеме, либо двуплечие рычаги. Из многозвенников наибольшее применение находит параллелограмм. Одним из достоинств рычажного механизма является относительная простота компенсации его основных погрешностей: теоретической и погрешностей длин плеч рычагов.

**Компенсация теоретических погрешностей.** Теоретические погрешности возникают из-за допущений, принимаемых в законе функционирования и в конструкции рычажного механизма. Допущения в законе функционирования возникают при замене точной функции преобразования приближенной. В одноплечих рычажных механизмах это происходит, например, при замене синусной  $y_1$  или тангенсной  $y_2$  зависимости приближенной линейной функцией  $y_n$  (рис. 5.16, а, б):  $y_1 = \arcsin(x/R)$ ;  $y_2 = \arctg(x/R)$ ;  $y_n \approx x/R$ . Возникающие при этом теоретические погрешности равны:

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_{11} &= \arcsin(x/R) - x/R \approx (x/R)^3/6 = y^3/6; \\ \Delta y_{21} &= \arctg(x/R) - x/R \approx -(x/R)^3/3 = -y^3/3. \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

Другой разновидностью теоретической погрешности одноплечевого рычажного механизма является конструктивное приближение реаль-

ной конструкции высшей кинематической пары (рис. 5.16, а) к ее идеализированному схемному представлению (рис. 5.16, в):

$$\Delta y_T = y - y_0 = \arctg [(x + r/\cos y - r)/R] - \arctg (x/R) \approx \\ \approx r [(1 - \cos y)/\cos y]/R \approx ry^2/(2R).$$

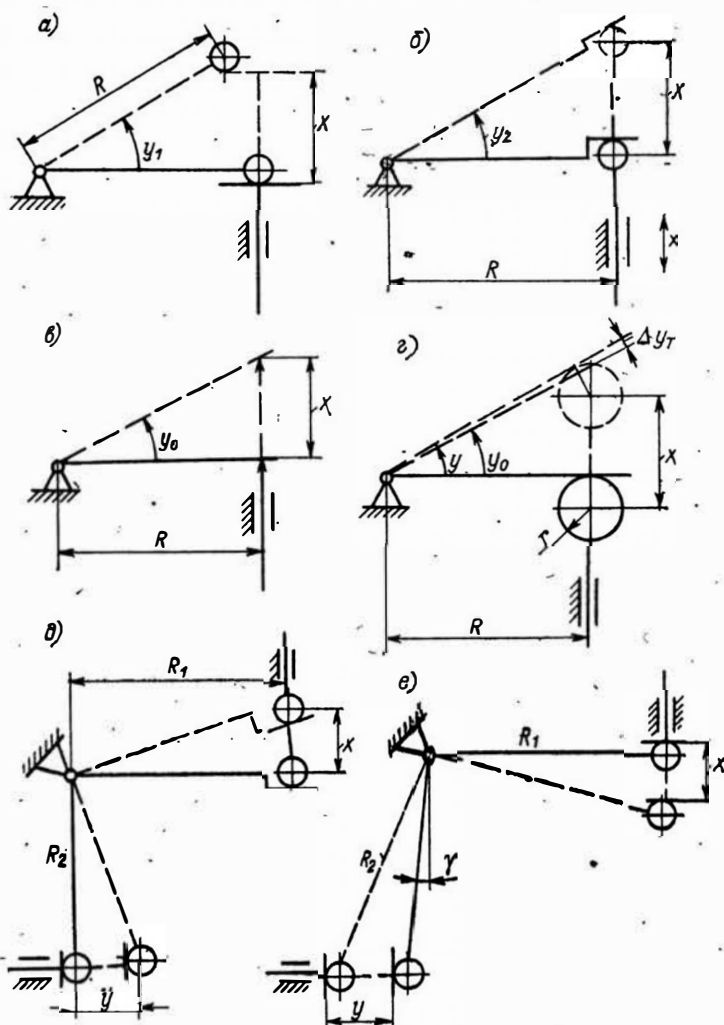


Рис. 5.16. Образование теоретических погрешностей простейших рычажных механизмов

В двуплечем рычажном механизме теоретические погрешности возникают, если одно из плеч выполнено по синусной, а другое — по тангенсной схемам (рис. 5.16, в), в то время, как принята линейная зависимость между  $x$  и  $y$ , либо углы между плечами рычага и направлениями поступательного движения не равны друг другу,



т. е. начальное положение одного из них не равно начальному положению другого (рис. 5.16, е).

В первом случае (рис. 5.16, б) теоретическая погрешность равна  $\Delta y_T = R_2 \sin \arctg(x/R_1) - R_2 x/R_1 \approx -R_2 x^3/(2R_1^3) \approx -y^3/(2R_2^2)$ ; во втором случае (рис. 5.16, е) —  $\Delta y_T = R_2 \{\sin[(\arcsin(x/R_1)) + \gamma] - \sin \gamma\} - R_2 x/R_1 \approx -(y\gamma^2/2 + y^2\gamma/2R_2 + y^3\gamma^2/12R_2^2)$ .

Появление теоретических погрешностей обычно возникает непреднамеренно, и их можно избежать при правильном конструировании рычажных механизмов:

тангенсного — по схеме рис. 5.16, б (а не 5.16, з);

оба плеча рычагов (рис. 5.16, д) выполнять либо по синусной либо по тангенсной схемам;

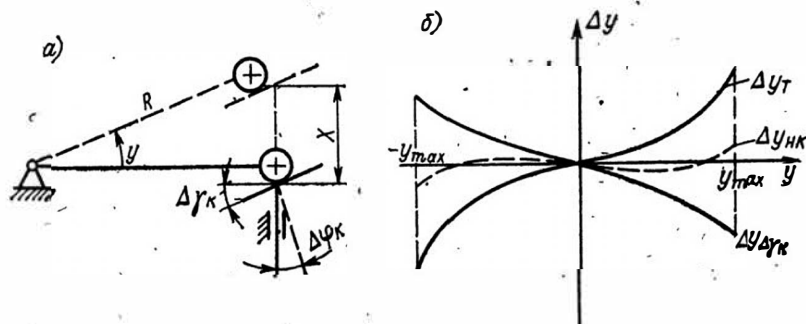


Рис. 5.17. Компенсация теоретической погрешности рычага наклоном площадки толкателя

избегать возникновения неравенства начальных положений плеч рычагов (рис. 5.16, е).

Компенсация теоретических погрешностей всех видов производится обычно изменением длины плеча рычага ( $\Delta R$ ). Так как это изменение приводит к мультипликативному изменению погрешности положения ведомого звена ( $\Delta y_{\Delta R}$ ), а теоретические погрешности имеют степенной характер, то полная компенсация возможна только в одном из положений ведомого звена (см. рис. 3.5). Для других положений рабочего диапазона недокомпенсация ( $\Delta y_{нк}$ ) определяется разностью между теоретической погрешностью и погрешностью от изменения длины плеча рычага:  $\Delta y_{нк} = \Delta y_T - \Delta y_{\Delta R}$ . Знак и численное значение  $\Delta R$  зависят от знака теоретической погрешности и выбранного положения точки ее полной компенсации.

В связи с тем, что теоретическая погрешность является неслучайной, коррекцию рычага можно было бы осуществлять изменением его размера на чертеже, однако на практике обычно применяют регулировку, что обусловлено необходимостью компенсации технологических погрешностей изготовления рычажного механизма.

Другой способ компенсации теоретической погрешности может быть основан на установке площадки толкателя (либо площадки тангенсного рычага) под углом  $\Delta \gamma_k$  к начальному положению рычага (рис. 5.17, а). В этом случае при смещении толкателя на величину  $x$

рычаг повернется на угол, который будет отличаться от расчетного на величину

$$\Delta y_{\gamma_K} \approx -\operatorname{tg} \Delta \gamma_K (R - R \cos y) / R \approx -y^2 \Delta \gamma_K / 2. \quad (5.17)$$

Подобрав соответствующее значение  $\Delta \gamma_K$ , можно произвести более полную компенсацию теоретической погрешности по сравнению с компенсацией изменением длины рычага, так как  $\Delta y_{\Delta \gamma_K}$  является степенной функцией (рис. 5.17, б). Значение  $\Delta \gamma_K$  здесь также будет определяться в зависимости от выбранного положения точки полной компенсации. Значение недокомпенсации, исходя из выражений (5.16) и (5.17) будет иметь вид

$$\Delta y_{\text{нк}} \approx y^3 / 6 - y^2 \Delta \gamma_K / 2.$$

Найдем, например, значение  $\Delta \gamma_{K1}$  и  $\Delta y_{\text{нк max}}$  для случая, когда  $\Delta y_{\text{нк}} = 0$  в точке  $y_{\text{max}}$ :

$$\Delta \gamma_{K1} = (2y_{\text{max}}^3 / 6) / y_{\text{max}}^2 = y_{\text{max}} / 3.$$

Значение  $y_1$ , соответствующее максимальной недокомпенсации, при этом найдем, приравняв нулю производную от разности функций, определяющих  $\Delta y_{\text{нк}}$ :  $(\Delta y_{\text{нк}})' = 3y_1^2 / 6 - 2y_1 \Delta \gamma_{K1} / 2 = 0$ , откуда  $y_1 = 2 \Delta \gamma_{K1} = 2y_{\text{max}} / 3$ .

Максимальное значение недокомпенсации (в точке  $y_1$ ) составит

$$\Delta y_{\text{нк max}} = (2y_{\text{max}} / 3)^3 / 6 - (2y_{\text{max}} / 3)^2 \Delta \gamma_{K1} / 2 = 4y_{\text{max}}^3 / (27 \cdot 6) = \Delta y_1 / 6,75.$$

Таким образом, мы видим, что теоретическая погрешность уменьшилась в 6,75 раза, что в 2,5 раза лучше результата, полученного при компенсации изменением длины плеча рычага при тех же условиях компенсации.

В случае, когда осуществляется такая коррекция, что  $\Delta y_{\text{нк}}$  в некоторой точке ( $y_2$ ) начального диапазона движения равна по величине, но обратна по знаку  $\Delta y_{\text{нк}}$  в конце диапазона движения (оптимальная коррекция при одном допуске на весь диапазон движения), значение  $\Delta \gamma_{K2}$  найдем из следующего равенства:

$$y_2^3 / 6 - y_2^2 \Delta \gamma_{K2} / 2 = - (y_{\text{max}}^3 / 6 - y_{\text{max}}^2 \Delta \gamma_{K2} / 2).$$

Преобразовав выражение, получим

$$\Delta \gamma_{K2} (y_2^2 + y_{\text{max}}^2) = (y_2^3 + y_{\text{max}}^3) / 3.$$

Учитывая, что  $y_2 = 2 \Delta \gamma_{K2}$ , получаем

$$y_{\text{max}}^3 - 3y_{\text{max}}^2 \Delta \gamma_{K2} - 4 \Delta \gamma_{K2}^3 = 0.$$

Для нахождения корней этого кубического уравнения применим решение Кордано [16]. Подставив  $y_{\text{max}} = x + \Delta \gamma_{K2}$ , получим

$$x^3 - 3x \Delta \gamma_{K2}^2 - 6 \Delta \gamma_{K2}^3 = 0.$$

Действительный корень этого уравнения:  $X = A + B$ , где  $A = \sqrt[3]{3 \Delta \gamma_{K2}^3 + \sqrt{8 \Delta \gamma_{K2}^6}}$ ;  $B = \sqrt[3]{3 \Delta \gamma_{K2}^3 - \sqrt{8 \Delta \gamma_{K2}^6}}$ , т. е.  $X = \Delta \gamma_{K2} \times$

$\times (\sqrt[3]{3 + \sqrt{8}} + \sqrt[3]{3 - \sqrt{8}}) \approx 2,36 \Delta\gamma_{\kappa 2}$ . Следовательно,  $y_{\max} = 3,36 \Delta\gamma_{\kappa 2}$ ;  $\Delta\gamma_{\kappa 2} = y_{\max}/3,36$ . Тогда  $y_2 = 0,59y_{\max}$ . Величина недокомпенсации в точках  $y_2$  и  $y_{\max}$ :

$$\Delta y_{\text{нк max}} \approx \pm \Delta y_{\tau}/9,4.$$

Таким образом, теоретическая погрешность уменьшилась почти в 10 раз.

Если в конструкции толкателя заложить возможность регулировки  $\Delta\gamma_{\kappa}$ , то можно компенсировать также погрешность длины плеча рычага.

При использовании данного метода компенсации следует иметь в виду, что данный метод можно применить для рычажных механизмов, работающих несимметрично относительно начального положения рычага (так как при изменении знака  $y$  должен изменяться знак  $\Delta\gamma_{\kappa}$ ).

Компенсация теоретической погрешности одноплечего рычажного механизма возможна также разворотом толкателя (на угол  $\Delta\varphi_{\kappa}$ , см. рис. 5:17, а), причем площадка может быть как перпендикулярна к толкателю, так и развернута относительно направления движения.

В том случае, когда площадка параллельна рычагу в его начальном положении, значение недокомпенсации определяют из выражения

$$\Delta y_{\text{нк}} = \arcsin(x/R) - x(1 - \cos \Delta\varphi_{\kappa})/R \approx y^3/6 - y \Delta\varphi_{\kappa}^2/2.$$

Полученный результат равнозначен коррекции изменением длины рычага.

Для случая, когда площадка перпендикулярна толкателю, значения недокомпенсации определим из выражения

$$\begin{aligned} \Delta y_{\text{нк}} &= \arcsin(x/R) - x(1 - \cos \Delta\varphi_{\kappa})/R - \operatorname{tg} \Delta\varphi_{\kappa} (R - R \cos y)/R = \\ &= y^3/6 - y \Delta\varphi_{\kappa}^2/2 - y^2 \Delta\varphi_{\kappa}/2. \end{aligned}$$

Полученный результат равнозначен компенсации теоретической погрешности двумя рассмотренными выше способами.

В том случае, когда функциональное устройство прибора содержит более одного рычажного механизма, их теоретическая погрешность может быть минимизирована с помощью полиномов Чебышева. Методика точностного синтеза таких механизмов, нашедших широкое применение в рычажно-зубчатых индикаторах и измерительных головках, изложена подробно в работах [15, 38].

**Компенсация технологических погрешностей.** Наибольшее влияние на точность работы рычажного механизма оказывает погрешность изготовления размеров плеч рычага. Значительные ошибки вносят также погрешности формы контактирующих поверхностей высших кинематических пар, а также зазоры в шарнирах.

Рассмотрим влияние указанных погрешностей на работу некоторых рычажных механизмов. В параллелограммном механизме (рис. 5.18, а), используемом в некоторых оптических приборах, угол поворота кривошипа ( $x$ ) должен быть передан на поворот ( $y$ ) коро-

мысла с передаточным отношением, равным единице:  $y = x$ . Так как размеры всех его звеньев: кривошипа ( $l_1$ ), коромысла ( $l_3$ ), шатуна ( $l_2$ ) и стойки ( $l_4$ ) имеют погрешности изготовления, то возникают погрешности углового положения ведомого звена и передачи угла (погрешность перемещения ведомого звена). Методом преобразования механизма или с помощью плана малых перемещений (см. приложение 1) найдем зависимости между указанными первичными погрешностями и погрешностью углового положения ведомого звена:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{y}_{\Delta l_1} &= \operatorname{tg} y \Delta l_1 / l_3; & \Delta y_{\Delta l_1} &= \Delta l_2 / (l_3 \cos y); \\ \Delta y_{\Delta l_3} &= -\operatorname{tg} y \Delta l_3 / l_3; & \Delta y_{\Delta l_4} &= -\Delta l_4 / (l_3 \cos y).\end{aligned}$$

Погрешности перемещения ( $\Delta p$ ), соответственно будут равны:

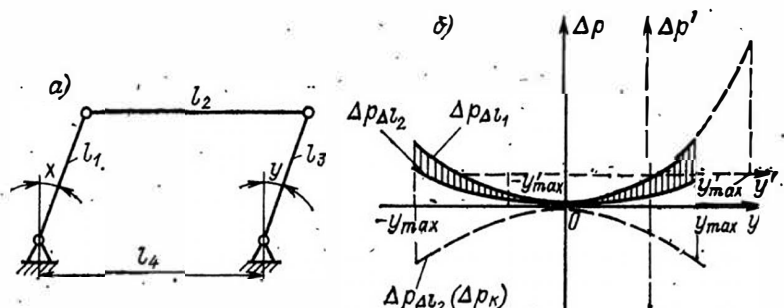


Рис. 5.18. Влияние погрешностей звеньев параллелограммного механизма на точность передачи движения

$$\begin{aligned}\Delta p_{\Delta l_1} &= (\operatorname{tg} y_T - \operatorname{tg} y_N) \Delta l_1 / l_3; & \Delta p_{\Delta l_3} &= \Delta l_2 / l_3 (\cos y_T - \cos y_N); \\ \Delta p_{\Delta l_3} &= -(\operatorname{tg} y_T - \operatorname{tg} y_N) \Delta l_3 / l_3; & \Delta p_{\Delta l_4} &= -\Delta l_4 / l_3 (\cos y_T - \cos y_N),\end{aligned}$$

где  $y_T$ ,  $y_N$  — текущее и начальное положения ведомого звена соответственно.

На рис. 5.18, б изображены графики погрешностей перемещения шатуна из-за погрешностей коромысла и кривошипа при повороте последнего в обе стороны от нулевого начального положения ( $x_N = y_N = 0$ ) на некоторый угол. Как видно из формул и графиков, погрешность передачи углового движения зависит от размера звена  $l_3$  и выбора начального положения параллелограммного механизма. Чем меньше параметр  $l_3$  и больше начальное значение  $y_N$  (см. системы координат  $\Delta p$ ,  $y$  и  $\Delta p'$ ,  $y'$ ), тем сильнее сказывается влияние погрешностей изготовления звеньев механизма на точность его функционирования.

Компенсацию погрешностей длин рычагов производят обычно регулировкой размера одного из звеньев параллелограмма. Однако такая регулировка не может обеспечить полной компенсации суммарной ошибки из-за различия функциональных зависимостей между нелинейной суммарной погрешностью, представляющей собой результат алгебраического суммирования частичных погрешностей, носящих тангенсный и косинусный характер, и коррекционным воздей-

ствием ( $\Delta p_k$ ), которое в зависимости от выбранного звена имеет характер лишь одной из этих функций. Фактически недокомпенсация определяется разностью упомянутых функций (заштрихованный участок на рисунке).

Следовательно, в том случае, когда требуется более точная компенсация, необходим второй компенсатор, корректирующий размер другого звена. Практическая регулировка размера звена может быть осуществлена с помощью двойного эксцентрика в одном из шарниров (например, в шарнире кривошипа для регулировки размера  $l_4$  стойки) и разъемной конструкции, регулируемой с помощью резьбового соединения, одного из соответствующих звеньев (например, кривошипа).

Корректировка погрешности изготовления длины плеча синусного рычага в одно- и двуплечем рычажных механизмах осуществляется обычно с помощью разъемной конструкции (например, рычага столика спектрального прибора, изображенного на рис. 4.15) разворотом эксцентрической сферической опоры рычага, либо деформацией. Деформация может быть необратимой (как, например, при подгибке рычага в фотодальномере «Блик» либо упругой (как при регулировке плеча рычага механизма тонкой фокусировки микроскопа типа «Винкель»). На рис. 5.19 изображен двуплечий рычаг, в котором упругой деформацией части конструкции регулируется одно из плеч ( $R$ ) и угол между рычагами.

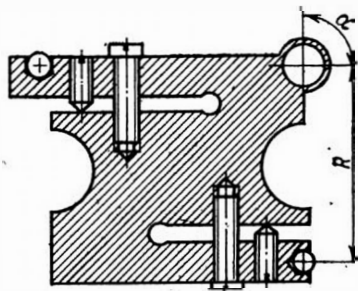


Рис. 5.19. Регулируемый двуплечий рычаг

Корректировка плеча рычага тангенсного механизма обычно производится изменением расстояния между шарниром и направляющими толкателя путем смещения шарнира в эксцентриковой оправе либо по направляющим.

Погрешности формы ( $\Delta h$ ) опорных поверхностей высших кинематических пар (рычага и толкателя) вследствие пересопряжения точки пятна контакта в процессе работы рычажного механизма приводят к появлению частичной ошибки, равной для одноплечего механизма, выполненного по синусной или тангенсной схемам  $\Delta y_{\Delta h} \approx \Delta h/R$ , а для двуплечего механизма (рис. 5.16,  $\partial$ ,  $e$ ) —  $\Delta y_{\Delta h_1} \approx R_1 \Delta h_1/R_2$ ;  $\Delta y_{\Delta h_2} \approx \Delta h_2$ , где  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  — погрешности формы высших кинематических пар на входе и выходе механизма соответственно.

Зазор в шарнире рычага приводит к погрешности передачи углового движения и эффекту мертвого хода, возникающему в момент реверсирования движения и приводящему, кроме погрешности функционирования, к ограничению чувствительности и неудобствам управления механизмом.

Рассмотрим влияние зазора на погрешности рычажного механизма на примере механизма фокусировки, схема которого изобра-

жена на рис. 5.20, а. Здесь поворот  $x$  винтового механизма передается через двуплечий рычаг на смещение  $y$  ползуна:  $y = nph x / (2\pi H)$ , где  $n$  — число заходов;  $p$  — шаг резьбы винтового механизма;  $h$ ,  $H$  — малое и большое плечи рычажного механизма.

Для определения смещения цапфы рычага в шарнире  $A$  следует найти направление суммарной силы  $P_\Sigma$ , приложенной к цапфе. Зная направление и численное значение силы, замыкающей ползун на рычаг ( $P$ ), определяем направление и численное значение (через отношение  $h/H$ ) реакции  $R$  со стороны винта на рычаг. В результате находим направление и численное значение суммарной силы  $P_\Sigma$ .

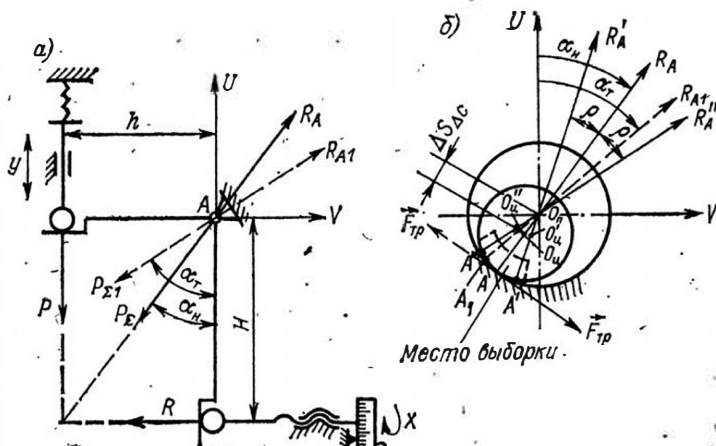


Рис. 5.20. Схема механизма фокусировки

действующей на цапфу (массой рычага пренебрегаем). Под действием этой силы цапфа смещается из центра подшипника ( $O_n$ ) по направлению  $P_\Sigma$  на величину  $\Delta S_{\Delta C} = \Delta C/2$  (рис. 5.20, б). Реакция со стороны подшипника  $R_A$  уравнивает силу  $P_\Sigma$ . Смещение центра цапфы из расчетного положения ( $O_n$ ) в ( $O_ц$ ) приводит к появлению погрешности: положения  $\Delta y_{\Delta C}$  и изменению длин плеч рычага  $\Delta H_{\Delta C}$ ,  $\Delta h_{\Delta C}$ :

$$\Delta y_{\Delta C} = \cos \alpha_n \Delta C/2; \quad \Delta H_{\Delta C} = \cos \alpha_n \Delta C/2; \quad \Delta h_{\Delta C} = \sin \alpha_n \Delta C/2.$$

Само по себе это смещение неопасно, так как результат его действия устраняется в процессе согласования шкал при сборке (если такое согласование необходимо), а изменения длин плеч рычагов взаимно компенсируют свое влияние:

$$\Delta y_{\Delta h} - \Delta y_{\Delta n} = y \sin \alpha_n \Delta C / (2h) - y \cos \alpha_n \Delta C / (2H) = 0.$$

Однако в процессе функционирования механизма при повороте рычага изменяется начальное направление ( $\alpha_n$ ) суммарной силы на некоторое текущее ( $\alpha_\tau$ ), которое зависит от текущего угла поворота рычага. Статическое равновесие установится в другом положении, точка контакта (и центр цапфы) сместится в положение  $A_1$  (см. рис. 5.20, б).

Возникает погрешность перемещения ползуна, равная разности ошибок положения его в текущем и начальном положениях механизма

$$\Delta p_{\Delta C} = \Delta y_{\Delta C T} - \Delta y_{\Delta C H} = -(\cos \alpha_T - \cos \alpha_H) \Delta C/2.$$

Рассмотренный случай не учитывает влияния сил трения в подшипнике цапфы. На самом же деле при вращении цапфы на нее действует сила трения  $F_{тр}$ , направление которой зависит от направления вращения цапфы. Под действием этой силы цапфа смещается навстречу движению до нового положения статического равновесия, определяемого углом трения  $\rho$ . Таким образом, в реальных условиях функционирования точка контакта уже в начальном положении рычага находится либо в точке  $A'$ , либо в  $A''$  (в зависимости от того, по часовой или против часовой стрелки вращалась цапфа при регулировке начального положения), а центр цапфы — в точке  $O'_ц$ , либо —  $O''_ц$  и наоборот. Смещение центра цапфы найдем из выражения  $O'_ц O''_ц \approx \rho \Delta C \approx f \Delta C$ , где  $f$  — коэффициент трения скольжения пары цапфа — подпятник. По осям  $U$  и  $V$  центр цапфы смещается на следующие величины:

$$\Delta U_{\Delta C, f} = [\cos(\alpha + \rho) - \cos(\alpha - \rho)] \Delta C/2 \approx \sin \rho \sin \alpha \Delta C \approx f \sin \alpha \Delta C;$$

$$\Delta V_{\Delta C, f} \approx f \cos \alpha \Delta C.$$

Из-за нестабильности сил трения, погрешностей форм подшипника и пяты при этом возникает эффект мертвого хода — несоответствие движений на входе и выходе рычажного механизма при реверсировании движения. Особенно сильно зазоры влияют на точность работы одноплечих рычажных механизмов, где смещения в шарнире приводят к некомпенсируемому изменению плеча рычага, сдвигу элементов (шкал, пластинок, зеркал), закрепленных на оси рычага и т. п.

Для уменьшения влияния зазора в шарнире на качество работы рычажного механизма применяют различные конструктивные решения, либо компенсацию зазора. Например, подвешивают рычаг на крестообразном пружинном шарнире [37], выполняют опоры на регулируемых центрах или призмах либо шарикоподшипниках. При использовании шарикоподшипников следует учесть, что радиальное биение  $\Delta r$  колец подшипника прямо передается на смещение ползуна:  $\Delta y_{\Delta r} = \Delta r$ . В том случае, когда применяют цилиндрический подшипник скольжения, зазор компенсируют селекцией пар, обжатием (см. рис. 5.29, а) или их притиркой. Другим способом уменьшения влияния зазора, практически устраняющим эффект мертвого хода при реверсе, является выполнение выборки на поверхности цапфы или подшипника в направлении действия реактивных сил (см. рис. 5.20, б). Таким образом, создается опора цапфы на две линии (площадки), разнесенные на угол, больший двойного угла трения, что создает условие устойчивого статического равновесия. Аналогичное решение применяется в рычажных механизмах наводящих устройств некоторых геодезических приборов [11].

#### 5.4. КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ НАПРАВЛЯЮЩИХ

Направляющие поступательного и вращательного движения обеспечивают заданное движение одних деталей (или сборочных единиц) относительно других. Как правило, направляющие обеспечивают одну (реже две) степень свободы подвижной детали относительно неподвижной, остальные степени свободы в их соединении должны быть отняты.

Качество отнятий лишних степеней свободы, характеризуемое деформациями и смещениями подвижной детали по нефункциональным направлениям, определяет такие показатели качества направляющих, как их точность, плавность работы (характеризуемую колебаниями сил и моментов при движении) и надежность.

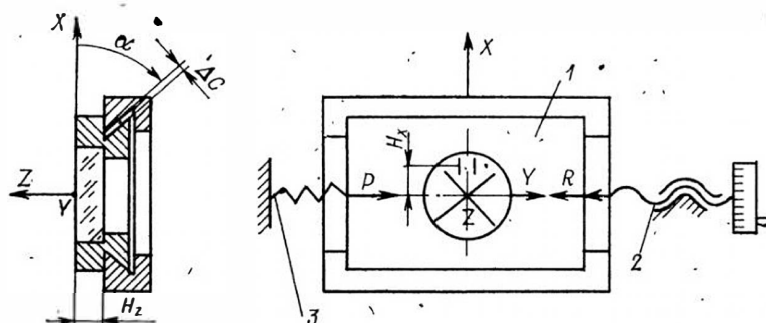


Рис. 5.21. Направляющие ползуна винтового окулярного микрометра

Основными погрешностями направляющих, влияющими на их точность и другие характеристики, являются погрешности формы и расположения поверхностей и зазоры в соединении с подвижной деталью. Из влияющих факторов — силы трения и колебания температуры.

Рассмотрим действие этих погрешностей. На рис. 5.21 изображена подвижная сетка (ползун) 1 винтового окулярного микрометра, перемещаемая в направляющих типа «ласточкин хвост» винтом 2 и пружиной 3 вдоль оси Y до совмещения биштриха, либо центра перекрестия, с изображением объекта.

Под действием равнодействующей сил P (силы, замыкающей пружины), R (реакции винта) и сил трения ползун, находящийся в состоянии неустойчивого статического равновесия, может сместиться вдоль осей X, Z или развернуться вокруг осей X, Y, Z в пределах зазора на следующие величины:

$$\Delta X_{\Delta C} = \Delta C / \sin \alpha; \quad \Delta X_{\Delta h} = \Delta h / \sin \alpha;$$

$$\Delta Z_{\Delta C} = \Delta C / \cos \alpha; \quad \Delta Z_{\Delta h} = \Delta h / \cos \alpha;$$

$$\Delta \varphi_{Z \Delta C} = \Delta C / (\sin \alpha B_Z); \quad \Delta \varphi_{Z \Delta h} = \Delta h / (\sin \alpha B_Z);$$

$$\Delta \varphi_{X \Delta C} = \Delta C / (\cos \alpha B_X); \quad \Delta \varphi_{X \Delta h} = \Delta h / (\cos \alpha B_X);$$

$$\Delta \varphi_{Y \Delta C} = \Delta C / (\cos \alpha B_Y); \quad \Delta \varphi_{Y \Delta h} = \Delta h / (\cos \alpha B_Y);$$



где  $\Delta C$  — зазор в соединении ползуна и направляющих;  $\Delta h$  — погрешность формы соответствующих поверхностей направляющих;  $\alpha$  — угол наклона поверхностей, ограничивающих соответствующие смещения и повороты;  $B_z, B_x, B_y$  — базы между элементами поверхностей, ограничивающих повороты ползуна вокруг осей  $Z, X$  и  $Y$  соответственно.

Не все смещения и повороты могут привести к смещению рабочего элемента сетки (биштриха или перекрестия) вдоль оси  $Y$  либо его смещению относительно рабочего элемента изображения вдоль этой же оси. Некоторые смещения и повороты значительно влияют на погрешность функционирования, другие оказывают слабое влияние. Например, смещение сетки вдоль оси  $X$  не приводит к погрешности функционирования окулярного микрометра в случае, когда элемент изображения (например, штрих шкалы) параллелен этой оси:  $\Delta y_{\Delta x \Delta C, \Delta h} = 0$ . В этом случае, когда элемент изображения имеет наклон ( $\gamma$ ) к оси  $X$  (например, изображение профиля резьбы), то возможна погрешность  $\Delta y_{\Delta x \Delta C, \Delta h} = \Delta x_{\Delta C, \Delta h} \operatorname{tg} \gamma$ .

Смещение сетки вдоль оси  $Z$  не приводит прямо к погрешности  $\Delta y_{\Delta z}$ , однако оно может быть опасным из-за возможной расфокусировки марок сетки и возникшего параллакса  $\Delta p = \Delta z_{\Delta h, \Delta C} : \Delta y_{\Delta z \Delta h, \Delta C} = = \Gamma t \Delta z_{\Delta h, \Delta C} / 250$ , где  $t$  — смещение глаза оператора.

Поворот сетки вокруг оси  $Z$  вызывает погрешность функционирования второго порядка малости при наводке по перекрестию и первого порядка — при наводке по биштриху из-за нарушения принципа Аббе:

$$\Delta y_{\Delta \varphi_Z \Delta C, \Delta h} \approx L \Delta \varphi_{Z \Delta C, \Delta h}^2 / 2; \quad \Delta y_{\Delta \varphi_Z \Delta C, \Delta h} \approx H_x \Delta \varphi_{Z \Delta C, \Delta h},$$

где  $L$  — расстояние от мгновенного центра поворота до центра перекрестия сетки;  $H_x$  — поперечный вылет биштриха относительно мгновенного центра поворота сетки.

Поворот сетки относительно оси  $X$  также приводит к погрешности первого порядка малости только при наличии вылета  $H_z$ :  $\Delta y_{\Delta \varphi_X \Delta C, \Delta h} \approx H_z \Delta \varphi_{X \Delta C, \Delta h}$ .

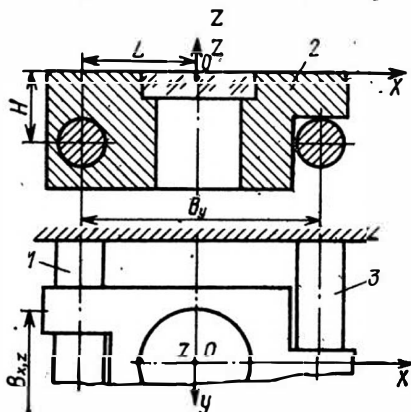
Разворот ползуна относительно оси  $Y$ , возникающей при его движении из-за наличия  $\Delta C$  и  $\Delta h$  под действием соответствующих сил и моментов может быть опасным вследствие возможной расфокусировки и параллакса марок сетки

$$\Delta p = \Delta z_{\Delta \varphi_Y \Delta C, \Delta h} \approx L_x \Delta \varphi_{Y \Delta C, \Delta h},$$

где  $L_x$  — проекция на ось  $X$  расстояния от мгновенного центра поворота до соответствующей марки.

В том случае, когда направляющие для прямолинейного движения состоят из двух и более деталей или имеют две и более поверхности, обрабатываемые не с одной установки (как например, широко применяемые цилиндрические и призматические направляющие), кроме рассмотренных выше погрешностей, влияние на точность функционирования оказывает также погрешность расположения их поверхностей.

На рис. 5.22 изображены цилиндрические направляющие 1, 3 ползуна 2. Направляющая 1 образует в соединении с ползуном пару IV класса (две пары II класса), а направляющая 3 — пару I класса. Цилиндры 1 и 3 не могут быть выставлены относительно друг друга абсолютно точно. В частности, непараллельность цилиндров друг другу в плоскости, параллельной плоскости  $YOZ$ , приводит к развороту сетки относительно оси  $Y$  и смещению ее рабочего элемента (точки  $O$ ) вдоль осей  $X$  и  $Z$ . Предположим, что цилиндр 1 лежит в плоскости, параллельной плоскости  $YOX$ , а цилиндр 3 непараллелен ему на величину  $\Delta\gamma$ . Тогда смещения точки  $O$  вдоль осей  $X$  и  $Z$  при перемещении ползуна на диапазон  $y$  будут равны:



$$\Delta x_{\Delta\gamma} = yH \Delta\gamma / B_T; \quad \Delta z_{\Delta\gamma} = yL \Delta\gamma / B_T.$$

Если цилиндр 1 непараллелен плоскости  $YOX$  на величину  $\Delta\phi_X$  (либо цилиндры 1 и 3 параллельны между собой, но не параллельны этой плоскости), то при перемещении ползуна происходит дополнительное смещение точки  $O$  относительно оси  $Z$ :  $\Delta z_{\Delta\phi_X} = y\Delta\phi_X$ .

Погрешность перемещения точки  $O$  вдоль рабочего направления из-за этой погрешности (второго порядка малости) будет равна  $\Delta y_{\Delta\phi_X} = y \Delta\phi_X^2 / 2$ .

В направляющих поступательного движения с трением качения зазор между направляющими и подвижной деталью обычно устраняется. В связи с этим основными погрешностями являются погрешности формы и расположения поверхностей направляющих, формы шаров, роликов, радиальное биение шарикоподшипников. На рис. 5.23 представлена схема направляющих поперечной каретки микроскопа УИМ-23, в которую входят направляющие 1, 4, 9, каретка 2, коренные шарикоподшипники 3, 5, 8, 10, 11, обеспечивающие перемещение каретки вдоль оси  $Y$  и отнимающие все остальные степени свободы, поджимные подшипники 6, 7, установленные на подпружиненных рычагах и служащие для замыкания подшипников 3, 10 на направляющие 4, 9. Основными первичными погрешностями, приводящими к смещению рабочей точки  $O$  каретки, являются следующие:

- погрешности формы верхних поверхностей (А) направляющих 1, 4, 9 ( $\Delta h_A$ ) и боковых поверхностей (Б) направляющих 4, 9 ( $\Delta h_B$ );
- непараллельность поверхностей А друг другу ( $\Delta\gamma_{OX}$ ) и горизонтальной плоскости  $XOY$  ( $\Delta\gamma_X$ );
- непараллельность поверхностей Б друг другу ( $\Delta\gamma_{OZ}$ ) и вертикальной плоскости  $OYZ$  ( $\Delta\gamma_Z$ );
- радиальное биение коренных шарикоподшипников ( $\Delta r$ );

непараллельность проекций осей вращения подшипников 5, 8, 11 на плоскость  $YOX$  (непараллельность плоскостей вращения подшипников направлению движения каретки, т. е. плоскости  $YOZ$ ).

Погрешности формы  $\Delta h_A$  и  $\Delta h_B$  направляющих приводят к развороту каретки относительно соответствующих осей и смещению точки  $O$ . Например, погрешность формы поверхности  $A$  направляющей 1 вызывает смещение точки  $O$  вдоль осей  $X$  и  $Z$ :

$$\Delta x_{\Delta h A} = H \Delta h_A / B_Y;$$

$$\Delta z_{\Delta h A} = L_1 \Delta h_A / B_Y.$$

Погрешность формы поверхности  $B$  направляющей 4 вызывает разворот каретки относительно оси  $Z$  и смещение точки  $O$  вдоль оси  $Y$  и  $X$ :

$$\Delta \varphi_{Z \Delta h B} = \Delta h_B / B_Z;$$

$$\Delta x_{\Delta h B} = l \Delta h_B / B_Z;$$

$$\Delta y_{\Delta h B} = L \Delta h_B / B_Z.$$

Непараллельность поверхностей  $A$  друг другу приводит к развороту ползуна относительно осей  $Y$  и  $X$  (см. пример с цилиндрическими направляющими). Непараллельность поверхностей  $A$  плоскости  $XOY$  приводит к тому, что при перемещении ползуна вдоль рабочего направления на величину  $y$  точка  $O$  будет смещаться вдоль оси  $Z$  на величину  $\Delta z_{\Delta \gamma_X} = y \Delta \gamma_X$ .

Непараллельность поверхностей  $B$  друг другу приводит к развороту каретки относительно оси  $Z$ , а непараллельность поверхностей вертикальной плоскости на величину  $\Delta \gamma_Z$  — к смещению рабочей точки вдоль оси  $X$ :  $\Delta x_{\Delta \gamma_Z} = y \Delta \gamma_Z$ .

Радиальное биение коренных подшипников действует аналогично погрешности формы направляющих, т. е. приводит к развороту каретки при ее движении относительно осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  и смещению рабочей точки вдоль этих осей. Например, радиальное биение подшипника 11 вызывает смещение точки  $O$  осей  $X$  и

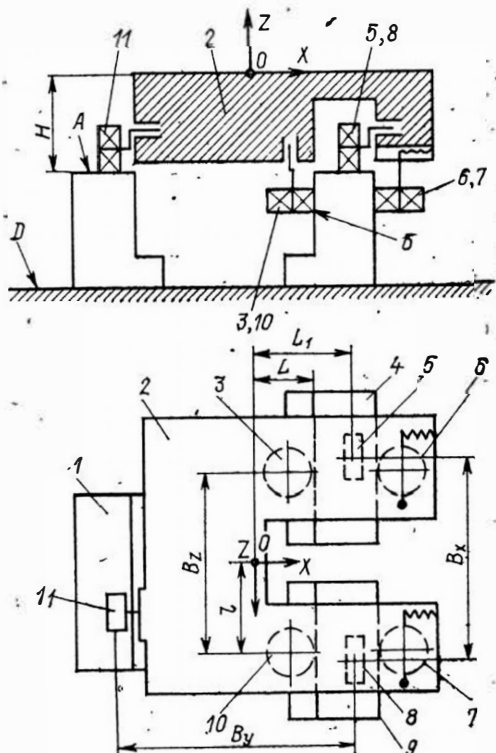


Рис. 5.23. Схема направляющих поперечной каретки измерительного микроскопа УИМ-23

$$\Delta x_{\Delta \rho} = H \Delta \rho / B_X; \quad \Delta z_{\Delta \rho} = L_1 \Delta \rho / B_X.$$

Непараллельность плоскостей вращения подшипников 5, 8, 11 направлению движения каретки приводит к возникновению трения скольжения между наружными кольцами шарикоподшипников и направляющими. Сила трения скольжения имеет поперечную составляющую, которая способствует отклонению каретки из плоскости YOZ. При изменении направления движения знак силы и направление отклонения меняются. Смещение каретки вдоль оси X фактически равно изменению контактной деформации подшипников 3, 10 и поверхностей Б направляющих 4, 9 из-за действия поперечной силы и может быть подсчитано по формулам Герца.

Точность работы направляющих вращательного движения определяют зазором в соединении подшипника и цапфы, погрешностью форм и расположения поверхностей, погрешностью формы шаров и биения вращающихся колец шарикоподшипников. Для определения влияния зазора в направляющих вращательного движения вначале находят смещение цапфы в подшипнике под действием приложенных сил, а затем погрешности функционирования устройства от этих смещений. Рассмотрим в качестве примера зубчатую передачу с ведущим 1 и ведомым 2 колесами, смонтированными на цилиндрических подшипниках скольжения (рис. 5.24, а, б).

Построим силы реакций в подшипниках колес при вращении ведущего колеса по часовой стрелке и определим соответствующие им смещения (рис. 5.24, а). Для упрощения задачи силы тяжести колес, силы трения в зубчатом зацеплении и инерционные силы не рассматриваем. Вращающий момент на ведущем колесе ( $M_{вр}$ ) уравновешивается реактивным моментом, образованным парой сил  $R_1$  и  $R_{1,2}$ . Момент сопротивления движению на ведомом колесе ( $M_c$ ) уравновешивается реактивным моментом, образованным силами  $R_2$  и  $R_{2,1}$ .

Под действием реакций  $R_1$  и  $R_2$  в подшипниках цапфы колес сместятся на величины:

$$\Delta S_1 = O_1 O'_1 = \Delta C_1 / 2; \quad \Delta S_2 = O_2 O'_2 = \Delta C_2 / 2.$$

где  $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$  — зазоры в опорах.

При вращении колес в подшипниках возникают силы трения  $F_1$  и  $F_2$ , смещающие точки контакта на угол трения  $\rho$ . В результате центры цапф смещаются в положения  $O'_1$  и  $O'_2$  для ведущего и ведомого колес соответственно. Погрешности положения, обусловленные смещениями в зазорах подшипников из-за внешних сил и сил трения, для ведущего и ведомого колес будут равны:

$$\Delta y_{\Delta C_1} = -\Delta S'_1 \cos(\alpha + \rho) / r_2 = -\Delta C_1 \cos(\alpha + \rho) / (2r_2);$$

$$\Delta y_{\Delta C_2} = -\Delta S'_2 \cos(\alpha - \rho) / r_2 = -\Delta C_2 \cos(\alpha - \rho) / (2r_2).$$

При одностороннем вращении ведущего колеса вследствие постоянства первичных погрешностей и угла зацепления погрешности функционирования передачи (кинематическая погрешность и погреш-

ность воспроизводимости) могут возникнуть только из-за изменения сил трения (изменения угла  $\rho_{1,2}$ ):

$$\Delta\rho_{\Delta\rho_1} = \Delta C_1 [\cos(\alpha + \rho_{1T}) - \cos(\alpha + \rho_{1H})] / (2r_2);$$

$$\Delta\rho_{\Delta\rho_2} = \Delta C_2 [\cos(\alpha - \rho_{2T}) - \cos(\alpha - \rho_{2H})] / (2r_2),$$

где  $\rho_{1,2T}$ ,  $\rho_{1,2H}$  — значения углов трения в текущем и начальном положениях ведущего и ведомого колес соответственно.

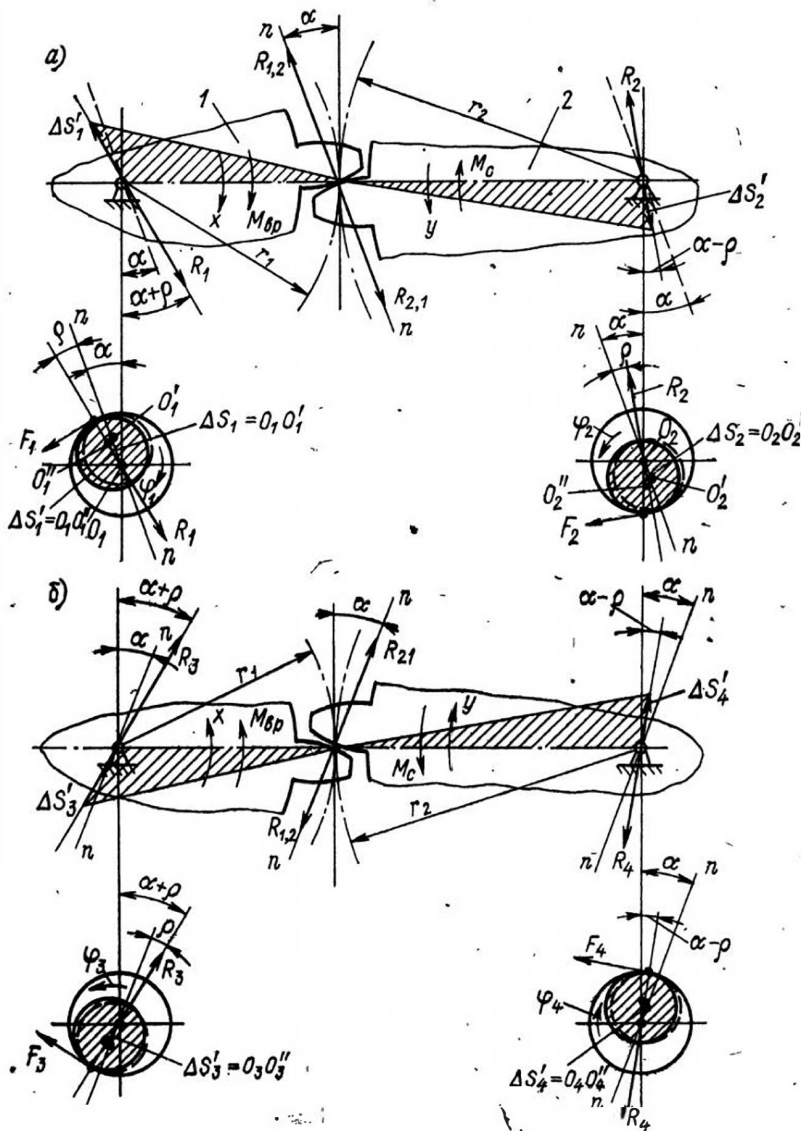


Рис. 5.24. Смещения цапф ведущего и ведомого зубчатых колес в подшипниках

При реверсировании движения ведущего колеса вращающий момент меняет знак, зацепление происходит по другим профилям, вследствие чего меняется направление реакций в подшипниках (рис. 5.24, б). Цапфы колес займут положения  $O'_3$  и  $O'_4$ . Погрешности положения колес будут равны:

$$\Delta y'_{\Delta C_1} = \Delta S'_3 \cos(\alpha + \rho)/r_2 = \Delta C_1 \cos(\alpha + \rho)/(2r_2);$$

$$\Delta y'_{\Delta C_2} = \Delta S'_4 \cos(\alpha - \rho)/r_2 = \Delta C_2 \cos(\alpha - \rho)/(2r_2).$$

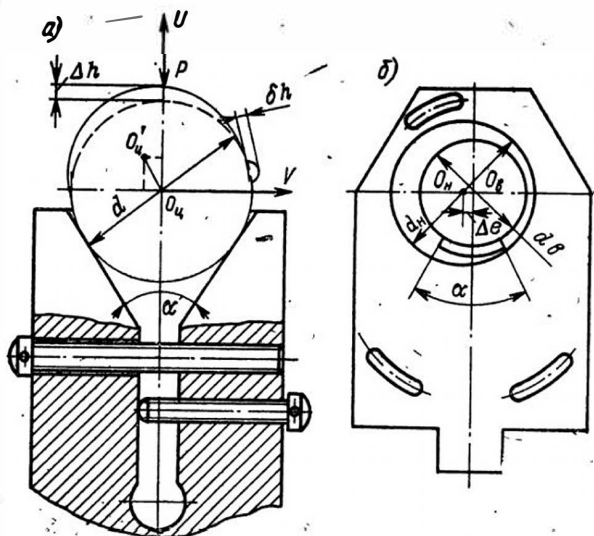


Рис. 5.25. Регулировка направляющих горизонтальной оси теодолита: а — призматических; б — цилиндрических

Следовательно, при реверсировании движения возникает мертвый ход, приводящий к появлению погрешности воспроизводимости из-за зазоров в подшипниках ведущего и ведомого колес:

$$\overline{\Delta v}_{\Delta C_1} = \Delta y_{\Delta C_1} - \Delta y'_{\Delta C_1} = -\Delta C_1 \cos(\alpha + \rho)/r_2;$$

$$\overline{\Delta v}_{\Delta C_2} = \Delta y_{\Delta C_2} - \Delta y'_{\Delta C_2} = -\Delta C_2 \cos(\alpha - \rho)/r_2.$$

В тех случаях, когда момент сопротивления ведомого колеса не меняет знак при реверсировании движения (например, при силовом замыкании ведомого колеса на ведущее и однопрофильном зацеплении колес), действие зазоров на погрешность функционирования передачи будет несколько иным.

Влияние погрешностей расположения и формы подшипников вращательного движения рассмотрим на примере призматической направляющей (лагеры) горизонтальной оси вращения теодолита (рис. 5.25, а). Погрешность расположения вершины призмы по высоте ( $\Delta H$ ), погрешность угла призмы ( $\Delta \alpha$ ) и погрешность диаметра цапфы ( $\Delta d$ ) приводят к наклону горизонтальной оси ( $\Delta \gamma$ ) и к погреш-

ностям первого порядка малости при измерении горизонтальных углов ( $\varphi$ ) и второго порядка — при измерении вертикальных углов теодолитом [32]:

$$\Delta\varphi_{\Delta\gamma} \approx \Delta\gamma \operatorname{tg} i; \quad \Delta i_{\Delta\gamma} \approx \Delta\gamma^2 \operatorname{tg} i,$$

где  $i$  — угол места.

Наклон горизонтальной оси равен отношению превышения центра одной из цапф над другой (находящейся на перпендикуляре к вертикальной оси теодолита) к расстоянию между лагерами ( $L$ ):  $\Delta\gamma = \Delta U/L$ . Превышение  $\Delta U$  связано с перечисленными первичными погрешностями следующими зависимостями:

$$\Delta U_{\Delta H} = \Delta H; \quad \Delta U_{\Delta\alpha} = d \cos(\alpha/2)/[2(1 - \cos \alpha)]; \quad \Delta U_{\Delta d} = \Delta d/[2 \sin(\alpha/2)].$$

Все эти погрешности приводят к постоянному отклонению горизонтальной оси.

Местная погрешность (шероховатость) цапфы  $\delta h$  и ее овальность  $\Delta h$  приводят к более опасным переменным отклонениям центра цапфы в вертикальной и горизонтальной плоскостях при ее повороте, максимальные значения которых можно оценить из следующих приближенных выражений [8]:

$$\Delta U_{\max \delta h} = \delta h \cos(\alpha/2)/\sin \alpha = \delta h/[2 \sin(\alpha/2)];$$

$$\Delta V_{\max \delta h} = \delta h \sin(\alpha/2)/\sin \alpha = \delta h/[2 \cos(\alpha/2)];$$

$$\Delta U_{\max \Delta h} = \Delta h \cos(\alpha/2)/\sin \alpha = \Delta h/[2 \sin(\alpha/2)];$$

$$\Delta V_{\max \Delta h} = \Delta h \sin(\alpha/2)/\sin \alpha = \Delta h/[2 \cos(\alpha/2)].$$

Если вращательное движение осуществляется в шарикоподшипниках, то основными первичными погрешностями являются осевое и радиальное биение его колец. Рассмотрим их влияние на точность работы углоизмерительной проекционной головки прибора для измерения мертвого хода редукторов (см. рис. 4.29). Принцип работы этого прибора основан на измерении угла поворота вала с помощью жестко соединенного с ним лимба, отсчеты с которого проектируются на матовый экран. Осевое биение ( $\Delta\rho_o$ ) подвижных внутренних колец шарикоподшипников, на которых смонтирован вал, может привести к расфокусировке изображения из-за перемещения рабочего участка лимба вдоль оси на  $\Delta\rho_o$ , а радиальное биение ( $\Delta\rho$ ) — к расфокусировке и погрешности измерения угла. Так как радиальное биение — переменная нерегулярная величина, направление которой изменяется в пределах от 0 до 360°, то осевое перемещение проектируемого участка лимба ( $\Delta l_o$ ) и погрешность отсчета ( $\Delta y$ ) определим из выражений:

$$\Delta l_o \Delta\rho = \pm R_\pi \Delta\rho/B; \quad \Delta y_{\Delta\rho} = \pm \Delta\rho/R_\pi,$$

где  $R_\pi$  — радиус рабочего участка лимба;  $B$  — расстояние между подшипниками.

Осевое перемещение лимба должно быть меньше или равно геометрической глубине резкости (в нашем примере 2,5 мкм), откуда допустимое значение  $\Delta\rho$  при  $R_\pi = 40$  мм и  $B = 100$  мм будет равно

$\Delta\rho = \Delta l_0 \Delta\rho B/R_\lambda = 2,5 \cdot 100/40 = 6,25$  мкм. С другой стороны, если допустимая погрешность измерения угла  $\Delta\gamma = 20''$ , то предельный допуск (без учета других первичных погрешностей) на радиальное биение будет равен  $\Delta\rho = \Delta\gamma R_\lambda = 20'' \cdot 40 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 4$  мкм. Очевидно, что если не будет производиться компенсация  $\Delta\gamma_{\Delta\rho}$ , то именно эта величина будет определять выбор класса подшипника.

*Технологические методы компенсации погрешностей направляющих* основаны на дополнительной обработке направляющих. Это доводочные операции, выполняемые, как правило, на доводочных станках либо слесарной обработкой. Для направляющих поступательного движения применяют шабрение поверхностей, притирку с помощью ручных или станочных притиров или сопрягаемых деталей. Направляющие вращательного движения доводят с помощью специальных притиров или сопрягаемой детали при вращении доводимой детали в патроне токарного или притирочного станка, либо при ее ручном повороте в центрах. Основной целью доводки является уменьшение погрешности формы и расположения поверхностей направляющих, влияющих на точность, плавность и надежность их работы. Следует заметить, что доводка является основным способом компенсации погрешностей формы деталей.

Рассмотрим некоторые примеры применения технологической компенсации погрешностей направляющих. На рис. 5.23 была приведена схема направляющих поперечной каретки микроскопа УИМ-23. Погрешность измерения на микроскопе в значительной степени определяется непрямолинейностью хода его кареток. По техническим требованиям отклонение от прямолинейности движения для каретки поперечного перемещения допускается на длине 100 мм не более 3 мкм в вертикальной и 1 мкм — в горизонтальной плоскостях. Эти требования накладывают жесткие допуски на первичные погрешности направляющих. Так, допуски на погрешность форм поверхностей *A* и *B* направляющих составляют: на неплоскостность при параметре шероховатости  $R_z = 0,08$  (контролируется пробным стеклом,  $N = 1$ ) — 0,25 мкм; на непараллельность поверхностей *A* друг другу и плоскости горизонта — не более  $10''$ ; на непараллельность поверхностей *B* —  $20''$ ; на радиальное биение наружного (сферического) кольца подшипника — не более 1 мкм; на непараллельность осей вращения подшипников 5, 8, 11 —  $30''$ .

Некоторые допуски выдерживаются только с помощью применения доводок. Так, поверхность *D* (платики чугунного основания под направляющие) шабруют до четырех-пяти точек на 1 см<sup>2</sup>, контролируя плоскостность по краске с помощью контрольных плит или линейек и добиваясь параллельности платиков, а затем поверхностей направляющих. Контроль осуществляют с помощью уровня. Плоскостность рабочих поверхностей направляющих (выполненных из стали ХВГ) доводят с использованием чугунных притиров и пасты ГОИ, осуществляя контроль с помощью пробного стекла. Такой же контроль осуществляют при креплении направляющих к платикам для выявления недопустимых объемных деформаций,



Доводкой и селекцией обеспечивают допуск на радиальное биение шарикоподшипников. Для этого доводят с помощью грибковых притиров биение беговых дорожек наружного и внутреннего колец подшипников, вращающихся в специальном патроне, до десятых долей микрометра. Между двумя вращаемыми плоскими планшайбами, одна из которых имеет торическую канавку, доводят до десятых долей микрометра погрешность форм шаров, которые затем калибруют через 0,1—0,2 мкм и комплектуют. Биение собранных шарикоподшипников подвергают контролю.

С помощью шабрения (до четырех-пяти точек на 1 см<sup>2</sup>) доводят также направляющие типа «ласточкин хвост», колонки и кронштейна визирной системы, установленные на поперечной каретке. Контроль производят по плавности и прямолинейности перемещения кронштейна. Проверку прямолинейности производят в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью индикатора или измерительной головки с ценой деления 1 мкм и регулируемых контрольных линеек длиной 200 мм и отклонением от плоскостности не более 0,25 мкм.

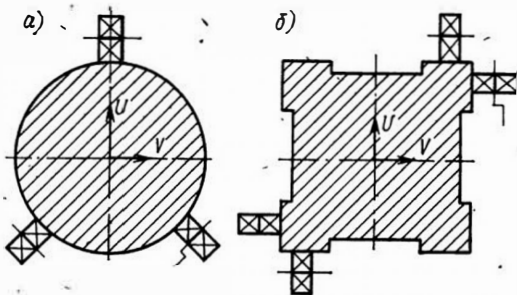


Рис. 5.26. Направляющие для поступательного движения

Перемещая кронштейн с индикатором по направляющим, регулировкой линейки добиваются одинаковых показаний индикатора в крайних положениях. Отклонение показаний индикатора в промежуточных положениях характеризует непрямолинейность направляющих, которая устраняется их подшабровкой. Допустимое отклонение от прямолинейности на длине 120 мм в зависимости от величины перемещения составляет от 1,5 до 18 мкм.

Другим примером применения доводочных операций является дополнительная притирка на планшайбе с наждаком поверхностей направляющих типа «ласточкин хвост», грубой и точной фокусировки предметного стола (или тубуса) биологических микроскопов. При ее выполнении получают более плавный ход ползуна в направляющих при минимальном зазоре.

В случае применения цилиндрических направляющих для прямолинейного движения (рис. 5.26, а) (например, как в компараторах ИЗА-2, ИЗА-7) весьма сложно добиться высокой прямолинейности образующих цилиндров для всех сечений. Лучшие результаты достигаются при использовании плоских прямоугольных направляющих (рис. 5.26, б), как, например, в горизонтальных и вертикальных длинномерх ИЗВ-4 и ИЗГ-4. Направляющие можно довести притиркой до плоскостности в одно-два кольца под пробное стекло.

Доводка направляющих вращательного движения с трением скольжения заключается обычно в доводке шеек цапф с помощью

притиров. Совместная плотная притирка цапфы и цилиндрического подшипника хотя и применяется, но не является лучшим средством против влияния зазора, для уменьшения которого ее обычно используют. Контроль погрешности формы цапфы при доводке производят на кругломерах или с помощью ультраоптиметров и интерферометров. Наиболее удобно производить контроль с помощью кругломеров, позволяющих получить графическую картину погрешностей формы доводимой цапфы.

*Конструктивные методы компенсации погрешностей направляющих* применяют в первую очередь для компенсации погрешностей расположения поверхностей направляющих и зазоров в соединениях. В некоторых случаях, когда компенсируется не сама первичная погрешность, а ее влияние, удастся компенсировать результат действия и погрешности формы направляющих.

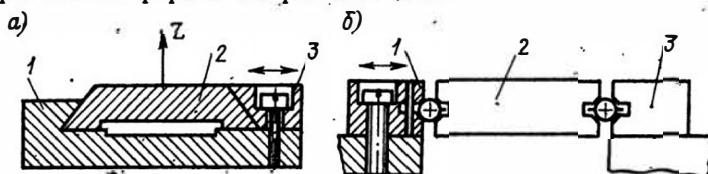


Рис. 5.27. Призматические направляющие: а — с трением скольжения; б — с трением качения

Рассмотрим некоторые примеры конструктивных компенсаторов.

В призматических направляющих (рис. 5.27; а, б), как с трением скольжения, так и с трением качения регулировка зазора между направляющими 1, 3 и ползуном 2 осуществляется обычно подвижкой одной из направляющих (3) в пределах зазоров под крепежные винты. При такой регулировке добиваются минимального зазора, обеспечивающего плавный ход на всем диапазоне перемещения ползуна. Главным условием, обеспечивающим эффективность компенсации, является отсутствие пирамидальности боковых поверхностей ползуна в вертикальной и горизонтальной плоскостях и погрешностей форм рабочих поверхностей. Для устранения этих дефектов направляющие с трением скольжения перед регулировкой зазора притирают совместно с ползуном, а ползун и направляющие с трением качения — с помощью притиров.

Перечисленные способы регулировки могут быть жесткими (т. е. с окончательной фиксацией подвижной направляющей), регулируемые с помощью винтов, клиньев, эксцентриков, и эластичными — с замыканием подвижного ползуна с помощью пружин.

Конструктивную компенсацию погрешностей расположения рабочих поверхностей рассмотрим на примере направляющих поперечной каретки микроскопа УИМ-23 (см. рис. 5.23). Поверхности В направляющих 4, 9 должны быть параллельны друг другу и плоскости YOZ (т. е. перпендикулярны к движению продольной каретки), параллельными должны быть и плоскости вращения шарикоподшипников 5, 8, 11

На рис. 5.28 приведена часть конструкции этих направляющих каретки микроскопа УИМ-23. Поверхность *Б* направляющей 3 устанавливается параллельно требуемому направлению путем разворота одного из ее концов на платике (поверхность *Д*) с помощью регулировочных винтов 4 (другой конец направляющей имеет шаровую опору 6, вокруг которой производится разворот).

Контроль параллельности направляющих производится с помощью зрительной трубки и коллиматора, имеющих прямоугольный корпус, прижимаемых к контролируемым поверхностям. Для контроля параллельности поверхности *Б* плоскости *YOZ* (т. е. перпендикулярности к направлению движения продольной каретки) используют дополнительно точную пентапризму и цилиндр с полированной площадкой, который вставляется в отверстие под подшипник направляющей продольной каретки. Зрительная трубка прижимается при этом к поверхности *Б*, а коллиматор — к полированной площадке цилиндра.

Для замыкания коренных подшипников кареток на направляющие они посажены на эксцентрические валики. Отпускают стопор 12, и разворотом валика 8 добиваются нужного соединения подшипника с направляющей. Такая регулировка обычно производится в том случае, когда прямолинейность хода каретки в горизонтальной плоскости более 1 мкм (контролируется по лекальной линейке, устанавливаемой на каретку, трубкой оптиметра, закрепленной в тубусе визирной системы). При этом разворачивают эксцентрики переднего и заднего подшипников 3 и 10 (см. рис. 5.23) в разные стороны, чем обеспечивают параллельность плоскостей вращения опорных подшипников 5, 8, 11 плоскостям *Б* (этим устраняется отклонение каретки из плоскости *YOZ*).

Плоскости опорных подшипников каретки предварительно выставляют параллельно друг другу разворотом клиновидных шайб (подобных шайбе 10), помещенных между фланцем оси и торцом внутреннего кольца. Требуемый наклон происходит после затягивания гайки 7 вследствие небольшого зазора между осью и внутренним кольцом подшипника. Контроль осуществляют с помощью уровня, устанавливаемого поочередно на торцы колец подшипников.

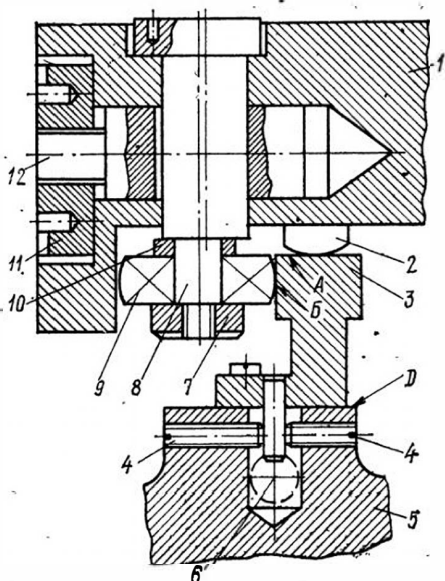


Рис. 5.28. Конструкция направляющих поперечной каретки микроскопа УИМ-23: 1 — каретка; 2, 9 — коренные подшипники; 3 — направляющая; 4 — регулировочный винт; 5 — основание; 6 — шаровая опора; 7 — гайка; 8 — эксцентриковая ось; 10 — клиновидная шайба; 11 — гайка; 12 — стопор

В конструкциях подшипников вращательного движения, изображенных на рис. 5.25, заложена возможность компенсации наклона оси цапф. Работая стяжным и упорным винтами призматической лагеры (см. рис. 5.25, а), цапфу можно опускать или поднимать, устанавливая горизонтальную ось вращения перпендикулярно к вертикальной оси. Разворачивая цилиндрический подшипник вокруг центра ( $O_n$ ) наружного пояса  $d_n$  (см. рис. 5.25, б), смещают по вертикали центр ( $O_b$ ) внутреннего отверстия  $d_b$ , выполненного эксцентрически по отношению к наружному. Для устранения смещения цапфы при реверсе в подшипнике делают неглубокую выборку под углом

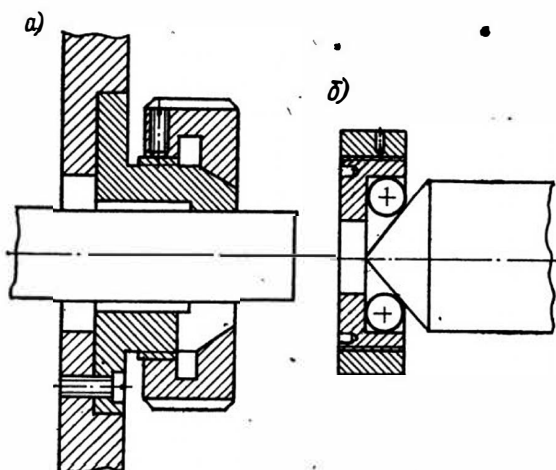


Рис. 5.29. Регулировка зазора в подшипниках

$\alpha = 90^\circ$ , разнося опору на две линии (площадки), касательные к которым много больше угла трения.

На рис. 5.29, а, б изображены подшипники с регулировкой зазоров с помощью разрезной цапги (рис. 5.29, а) и регулируемой центральной опоры (рис. 5.29, б). В таких конструкциях для «эластичной» компенсации зазоров цапгу и центровую опору можно замкнуть пружинами.

Компенсацию осевых зазоров направляющих вращательного движения осуществляют замыканием валов на шаровую опору (см. рис. 5.9). При регулировке зазоров в направляющих поступательного и вращательного движения с жестким замыканием следует обратить внимание на то, что оставшийся зазор должен быть достаточным для удержания смазки (не менее 1 мкм) и обеспечивать отсутствие температурного заклинивания. Температурное заклинивание опасно в том случае, когда направляющие и ползун (вал) изготовлены из разных материалов. Зазор ( $\Delta C$ ) изменяется, как известно, при изменении температуры ( $\Delta t$ ) по следующему соотношению:

$$\Delta C \approx \Delta C_0 + (\alpha_1 - \alpha_2) L \Delta t,$$

где  $\Delta C_0$  — зазор при  $t = 20^\circ \text{C}$ ;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  — коэффициенты линейного расширения сопрягаемых деталей;  $L$  — размер сопрягаемых деталей в посадке.

Для уменьшения опасности температурного заклинивания при малых зазорах и больших перепадах температуры сопрягаемые детали изготавливают из одного материала, но одну из деталей (ползун, вал) подвергают закалке.

Рассмотрим компенсации не самих погрешностей направляющих, а их влияния на точность работы функционального устройства. Компенсация подобного рода осуществляется применением систем, перемещаемых по направляющим и нечувствительных к их погрешностям, например, разработанные сотрудниками ЛОМО универсальная длинноизмерительная машина с лазерным интерферометром, нечувствительная к непрямолинейности перемещения измерительной каретки по направляющим станины, и серия датчиков линейных перемещений (на основе линейного датчика ГОИ [35]), которыми оснащен ряд серийных приборов.

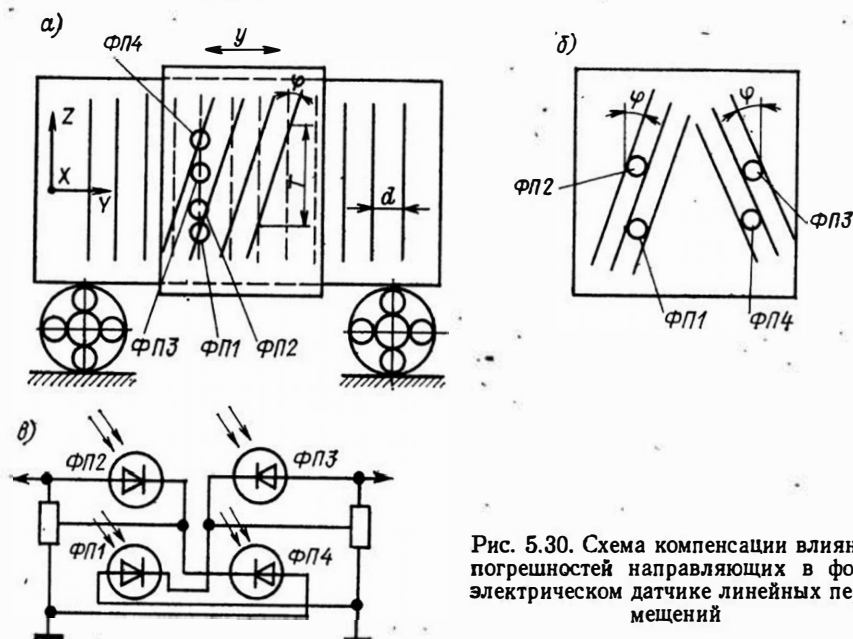


Рис. 5.30. Схема компенсации влияния погрешностей направляющих в фотоэлектрическом датчике линейных перемещений

Рассмотрим работу одного из таких датчиков, схема которого была приведена на рис. 1.13. Штрихи прозрачной дифракционной решетки имеют наклон по отношению к штрихам непрозрачной решетки (рис. 5.30, а), поэтому при смещении ее возникает смещение муаровой полосы дифрагированных лучей. В упрощенном виде можно представить период муаровой полосы как  $T = d/\varphi$ , где  $d$  — постоянная решетки;  $\varphi$  — угол наклона штрихов. В результате с четырех фотоприемников (два из них нужны для определения направления движения, два других — для подавления постоянной составляющей сигнала), сдвинутых относительно друг друга на  $1/4$  периода, снимаются электрические сигналы вида:

$$U_{\Phi\Pi 1} = U_c + U_v \sin(2\pi y/T) = U_c + U_v \sin \omega t;$$

$$U_{\Phi\Pi 2} = U_c + U_v \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$U_{\Phi\Pi 3} = U_c + U_v \sin(\omega t - \pi);$$

$$U_{\Phi\Pi 4} = U_c + U_v \sin(\omega t - 3\pi/2),$$

где  $U_c$ ,  $U_v$  — постоянная и переменная составляющие сигнала соответственно. Вычитая из первого сигнала третий, а из второго — четвертый, подавляют постоянную составляющую и удваивают полезную переменную:

$$U_{\Phi 1-3} = 2U_v \sin \omega t; \quad U_{\Phi 12-4} = 2U_v \cos \omega t.$$

Сдвиг фаз этих сигналов относительно друг друга на  $\pi/2$  позволяет выявить направление движения, а преобразование синусоидального сигнала в прямоугольный и подсчет прямоугольных импульсов с помощью реверсивного счетчика — определить величину перемещения.

При перемещении подвижной решетки вдоль оси  $Y$ , из-за погрешностей направляющих возможны ее повороты относительно осей  $Y$ ,  $Z$ ,  $X$ . Повороты вокруг осей  $Y$  и  $Z$  для такого датчика неопасны [35]. Поворот относительно оси  $X$  (до  $10''$  — для кареток продольного и поперечного перемещения микроскопа УИМ-29) приводит к погрешности линейного датчика в связи с изменением угла  $\varphi$ , приводящего к изменению шага муаровой полосы и сдвигу фазы ( $\Delta\gamma$ ) сигналов с приемников:

$$\Delta T_{\Delta\varphi} = T \cdot \Delta\varphi_X / \varphi; \quad \Delta\gamma = l 2\pi \Delta\varphi_X / d,$$

где  $l$  — расстояние между приемниками.

Для компенсации этой погрешности было предложено наносить на прозрачную решетку два участка наклонных штрихов с равными, но противоположно направленными углами наклона (см. рис. 1.13 и 5.30, б). Теперь при перемещении подвижной решетки возникают две системы муаровых полос, движущиеся навстречу друг другу. Если происходит наклон решетки, то для одного участка  $\varphi$  увеличивается на  $\Delta\varphi_X$ , а для другого — уменьшается на  $\Delta\varphi_X$  (т. е. увеличиваются или уменьшаются периоды соответствующих муаровых полос). Расположив два фотоприемника напротив одного, а два других — напротив второго участка прозрачной решетки (см. рис. 5.30, б), с учетом сдвига фазы получим

$$U_{\Phi 1} = U_c + U_v \sin(\omega t + \Delta\gamma_{\Delta\varphi_X});$$

$$U_{\Phi 12} = U_c + U_v \sin(\omega t - \pi/2 + \Delta\gamma_{\Delta\varphi_X});$$

$$U_{\Phi 13} = U_c + U_v \sin(\omega t - \pi - \Delta\gamma_{\Delta\varphi_X});$$

$$U_{\Phi 14} = U_c + U_v \sin(\omega t - 3\pi/2 - \Delta\gamma_{\Delta\varphi_X}).$$

Вычитая из первого сигнала третий, а из второго — четвертый, с учетом малости  $\Delta\gamma$ , получаем

$$U_{\Phi 1-3} = 2U_v \sin \omega t \cos \Delta\gamma \approx 2U \sin \omega t;$$

$$U_{\Phi 12-4} = 2U_v \cos \omega t \cos \Delta\gamma \approx 2U \cos \omega t.$$

Схема подключения приемников представлена на рис. 5.30, в. Таким образом, мы видим, что отсчетная система малочувствительна к погрешностям направляющих, которые приводят к наклону каретки. Полной компенсации здесь не происходит также из-за того, что при наклоне решетки несколько изменяется амплитуда сигнала.

Фотоэлектрический датчик линейных перемещений удобен также в юстировке. Расстояние между фотоприемниками (и центрами линз 4), равное  $T/4$ , выдерживается технологически (см. рис. 1.13). Не требует строгой выдержки расстояние между дифракционными решетками (0,5—1 мм), работающими в параллельном ходе лучей. Параллельность дифракционных решеток выдерживается технологически либо устанавливается с помощью автоколлиматора. Получение необходимого сдвига фаз в  $\pi/2$  между сигналами фотоприемников 1—2 и 3—4 осуществляется разворотом прозрачной дифракционной решетки вокруг оси  $X$ , сдвиг фаз в  $\pi$  между фотоприемниками 1—3 и 2—4 — перемещением всего блока вдоль оси  $Z$ .

В датчике предусмотрена также компенсация постоянной составляющей погрешности шага дифракционной решетки. Для этого отражающую дифракционную решетку изготавливают с шагом, несколько меньшим требуемого, а затем, устанавливая ее под некоторым углом к направлению смещения и наклоняя вокруг оси  $X$ , добиваются вдоль оси  $Y$  шага, равного номинальному шагу.

#### 5.5. УСТРОЙСТВА ЮСТИРОВКИ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Погрешности расположения источников и приемников оптического излучения приводят к ухудшению показателей точности функционирования ОП, качества изображения, падению отношения сигнал/шум. При проектировании функциональных узлов с приемниками и источниками излучения обычно предусматривают тот или иной метод компенсации погрешностей их расположения относительно некоторых баз.

Наибольшее распространение получили конструктивные методы компенсации (применяют также селекцию и изредка — дополнительную обработку корпусов), обеспечивающие центровку и фокусировку приемников и источников излучения. Рассмотрим некоторые конструкции креплений светодиодов, позволяющие производить юстировку индикатриссы их излучения, фотодиодов и матриц ПЗС с юстировкой положения их чувствительного слоя<sup>1</sup>.

На рис. 5.31 изображено устройство для крепления светодиода 4, позволяющее производить юстировку направления индикатриссы излучения. Юстировка производится поворотами светодиода в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью двухосного шарнира. Поворот вокруг оси  $X$  осуществляется разворотом цилиндро-конической оси 2 при ослабленной гайке 6 в цилиндрическом валике 1. Разворот вокруг оси  $Y$  осуществляется покачиванием цилиндрического валика 1 в корпусе 9 при ослаблении винтов 10. Светодиод крепится на оси 2 с помощью разрезной втулки 3 и подключается через разъем 8. Детали 5—7, 11, 12 выполняют защитную и вспомогательные роли. Фокусировка светодиода производится небольшими осевыми подвижками его относительно втулки 3.

<sup>1</sup> Рис. 5.31—5.34 предоставлены Г. В. Бременковым.

На рис. 5.32 показано устройство для крепления светодиода 1 с обеспечением его фокусировки и регулировки направления индикатриссы излучения. Фокусировка производится перемещением детали 4 по резьбе корпуса 5. Регулировка направления излучения осуществляется разворотами шаровой детали 3 при ослабленном резьбовом кольце 8. Для обеспечения возможности поворотов детали 3 в ней предусмотрено резьбовое отверстие, в которое при юсти-

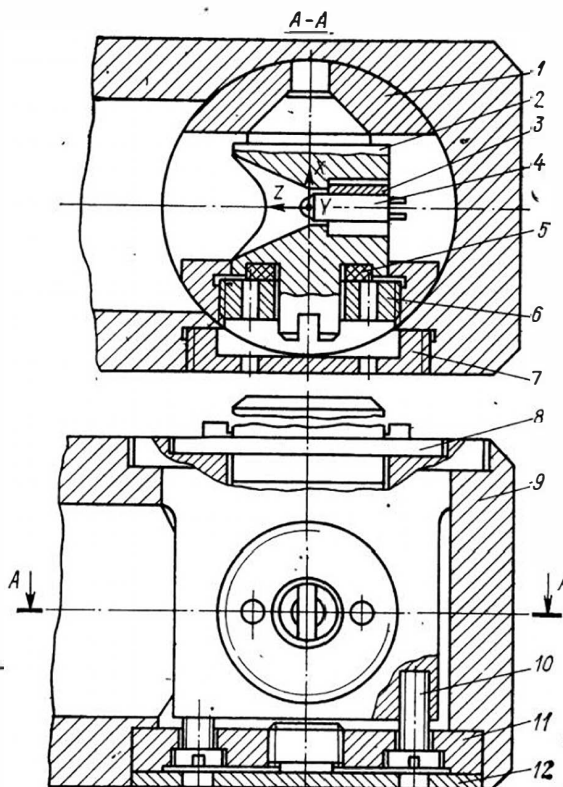


Рис. 5.31. Устройство для крепления светодиода с юстировкой направления излучения

ровке заворачивают втулку (внутри втулки пропущены провода для питания светодиода), с помощью которой производят покачивание детали. Крепление светодиода здесь также осуществляется с помощью разрезного кольца 2 и винта 6 (в предыдущей конструкции винт не показан). Недостатком данной конструкции является то, что при осуществлении фокусировки из-за вращения детали 4 возможно появление децентрировки излучающей площадки светодиода.

Устройство для крепления светодиода, изображенное на рис. 5.33, позволяет производить фокусировку сетки 1, освещаемой светодиодом 12, плавными регулировками с помощью резьбовых колец 2 и 5. От проворота сетка удерживается винтом с цилиндрической го-



ловкой 4. Сферическая деталь 8 может покачиваться вокруг трех осей непосредственно от руки либо с помощью шпильки, вводимой в отверстие платы 9.

На рис. 5.34 изображено устройство для крепления светодиода 1 с обеспечением его центрировки, фокусировки и регулировки направления излучения. Центрировка осуществляется с помощью эксцентрических кольца 10 и оправы 4. Фокусировка производится подрезкой прокладного кольца 6. Регулировка направления излучения выполняется аналогично рассмотренной выше схеме. Питание на светодиод подается через разъем 13.

Юстировка обычных фотодиодов заключается в их фокусировке и центрировке, что достигается, например, с помощью эксцентрических (см. рис. 5.34) и резьбовых (см. рис. 5.33) колец.

Узлы крепления позиционно-чувствительных фотодиодов и матриц ПЗС должны обеспечивать их центрировку, фокусировку, разворот вокруг оси и при необходимости установку чувствительной площадки перпендикулярно к падающему осевому пучку лучей. В том случае, когда фокусировка и (или) центрировка изображения осуществляется оптическими преобразователями сигнала (объективами, зеркалами), в конструкции крепления фотодиодов и ПЗС следует предусмотреть возможность их разворотов вокруг оси падающего пучка.

На рис. 5.35, а изображено устройство для крепления фотоприемника 8 со следующими юстировочными подвижками. Смещение вдоль оси  $Z$  и разворот приемника вокруг нее осуществляется от руки при ослаблении винта 7 хомутового зажима детали 6. Центрировка производится двумя парами винтов 5, расположенными под углом  $90^\circ$  друг к другу. Наклоны чувствительной площадки относительно осей  $X$ ,  $Y$  выполняются наклонами детали 9 с помощью коаксиальных сферических шайб 1, 2, 4, одна из которых (например, 4) в процессе юстировки подрезается. Для того чтобы производить независимые наклоны относительно осей  $X$ ,  $Y$ , три винта 3 располагаются под углом  $90^\circ$  друг к другу.

В некоторых случаях для обеспечения осевых смещений приемника и возможности его наклонов замыкание детали 9 осуществляется на три регулируемые резьбовые втулки 10 (рис. 5.35, б).

Для повышения надежности юстировки винты 3 и 5 заливают лаком или клеем. В некоторых случаях клеем фиксируют положение всех подвижных деталей. Если требуется высокая чувствительность

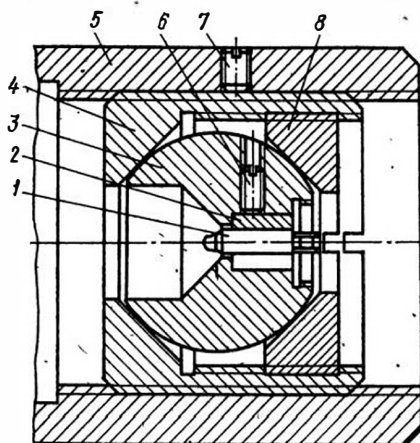


Рис. 5.32. Устройство для крепления светодиода с фокусировкой и регулировкой направления излучения

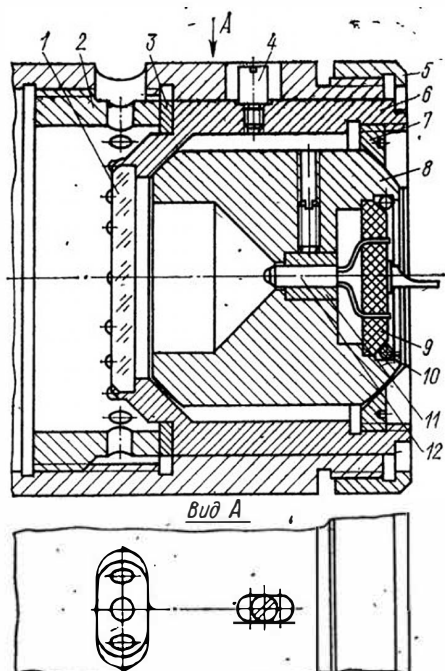


Рис. 5.33. Устройство для крепления светодиода с плавной фокусировкой

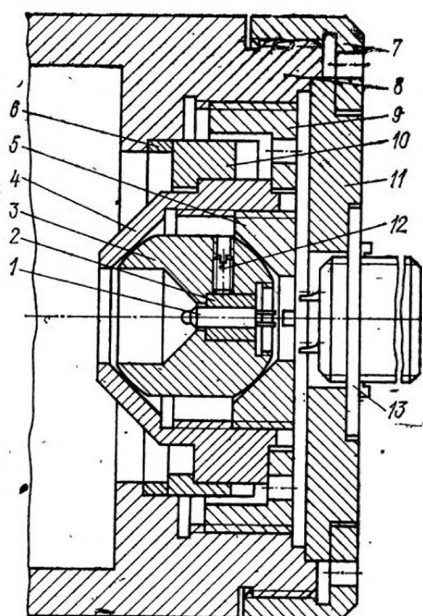


Рис. 5.34. Устройство для крепления светодиода с его центровкой, фокусировкой и регулировкой направления излучения

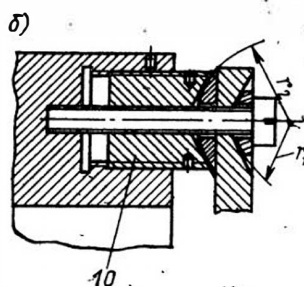
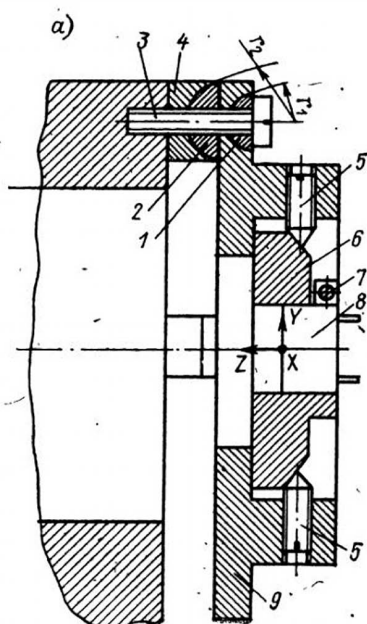


Рис. 5.35. Устройство для регулируемого крепления фотоприемника

разворота приемника вокруг оси падающего пучка и его фокусировки, то это можно сделать с помощью конструкции, изображенной на рис. 5.36. Здесь фокусировка приемника 3 осуществляется осевой подвижкой детали 5 резьбовыми кольцами 2, 4. Разворот при незатянутых окончательно винтах 1 производится с помощью съемного эксцентрика 7. Центрировка выполняется винтами 6.

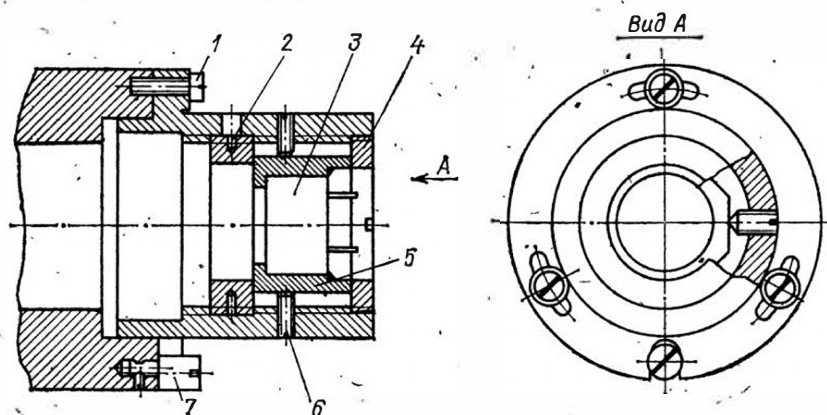


Рис. 5.36. Устройство для крепления фотоприемника с плавными фокусировкой, центрировкой и разворотом чувствительной площадки

Весьма часто угловое положение фотоприемника юстируется с помощью упругой деформации частей корпусной детали, либо с помощью упругих шарниров. При таком способе регулировки иногда появляются отклонения, возникающие из-за гистерезисных явлений и упругого последействия в материалах деформируемых деталей

## 5.6. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ МУФТЫ

Муфты предназначены для соединения концов двух валов для передачи крутящих моментов и углового движения с одного вала на другой. С их помощью происходит подсоединение электродвигателей к приводам подвижных функциональных устройств прибора (сканирующим системам, системам фокусировки, наведения), соединение угловых фотоэлектрических, индуктивных, потенциометрических и других датчиков перемещения с вращающимися элементами прибора и т. д. Основным требованием, предъявляемым к муфтам, применяющимся в ОП, является точность передачи углового движения.

Различают три погрешности передачи углового движения: кинематическую — разность между углами поворота ведомого и ведущего валов; мертвый ход (холостое) — не передаваемое на вал движение ведущего вала, возникающее в момент реверсирования движения; неравномерность углового движения — колебание угловой скорости ведомого вала при постоянной угловой скорости ведущего вала. Все эти погрешности в существенной степени зависят от погрешностей расположения геометрических осей соединяемых валов (их несоосности, перекосов и осевого смещения).

Для компенсации влияния погрешностей расположения соединяемых валов применяют так называемые компенсационные муфты. Наибольшее распространение из них получили поводковые муфты, муфта Ольдгема, карданная, мембранная и сильфонная муфты.

Поводковые и карданная муфты не позволяют получить высокой точности передачи углового движения из-за кинематической погрешности и неравномерности движения при несоосности соединяемых валов. Муфта Ольдгема свободна от этих погрешностей, но обладает большим мертвым ходом. Обычные мембранные муфты хорошо ком-

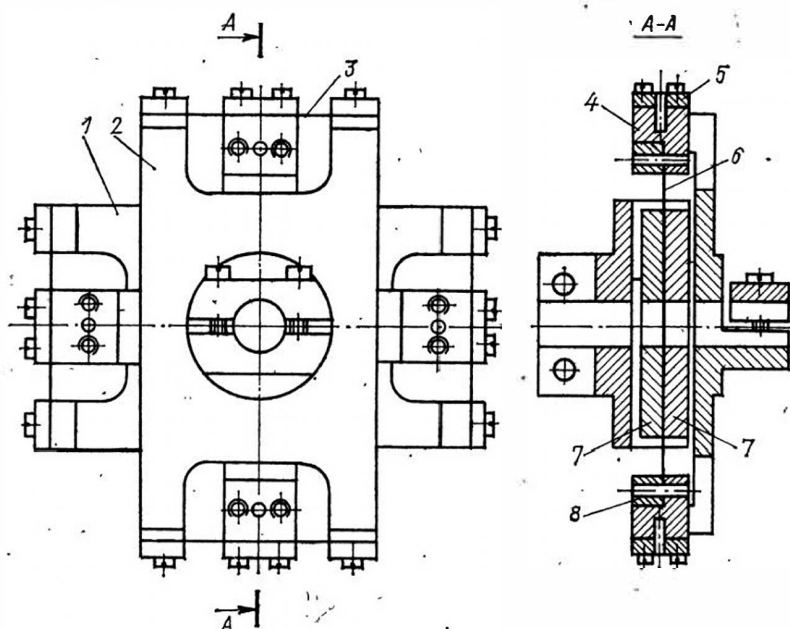


Рис. 5.37. Упругая муфта

пенсируют перекося валов и недостаточно их несоосность. Наиболее точными из перечисленных муфт при небольших перекосях и несоосностях валов являются сильфонные муфты. Однако для их изготовления требуется материал, обладающий высокими упругими свойствами с отсутствием гистерезиса и упругого последействия.

Упругая муфта, разработанная под руководством В. В. Кулагина, изображена на рис. 5.37. Она содержит две полумуфты 1, 2, крепящиеся накладками к концам соединяемых валов, два диска 7, между которыми закреплена крестообразная мембрана 6, четыре угольника 4 и накладки 5, 8, с помощью которых происходит соединение мембраны и четырех плоских пружин 3 с полумуфтами. Такое решение позволило создать компактную муфту, компенсирующую смещение и перекося соединяемых валов. Перекося и осевые смещения полумуфт компенсируются мембраной, а несоосность валов — плоскими пружинами. При небольших крутящих моментах (менее 1 Н·см), децентрировках соединяемых валов не более 0,1 мм и пере-

косах в 10—15' кинематическая погрешность муфты не превосходит нескольких угловых секунд.

На рис. 5.38 приведена конструкция крестообразной муфты, разработанной в ЛИТМО. Ее достоинством является способность компенсации несоосности, перекосов и осевых смещений соединяемых валов, простота конструкции и достаточно высокая точность передачи движения. Муфта содержит всего три относительно сложных детали: полумуфты 1, 3 и крестообразный вкладыш 2. На концах полумуфт имеются призматические канавки, направленные перпендикулярно к оси. На концах вкладыша призматические канавки направлены параллельно оси. Соединение полумуфт с вкладышем осуществляется посредством четырех шариков 5, установленных

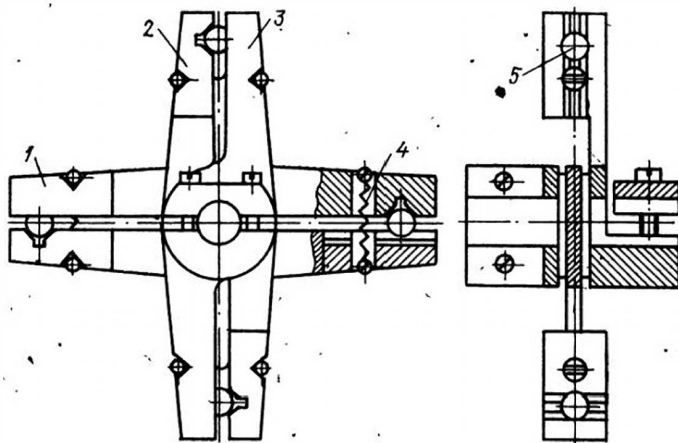


Рис. 5.38. Крестообразная призматическая муфта

в соответствующие призматические канавки, и силового замыкания с помощью пружин 4, что позволяет удерживать шарики в требуемом положении и осуществлять осевое соединение полумуфт без дополнительных деталей.

Точность передачи движения определяется в основном погрешностями формы шариков и поверхностей призматических канавок полумуфт и вкладыша. Погрешность угла поворота ведомой полумуфты равна  $\Delta\varphi = \Delta h / [2 \sin(\alpha/2)]$ , где  $\alpha$  — угол призматической канавки;  $\Delta h$  — погрешность формы.

Как видно из формулы, погрешность муфты будет уменьшаться с увеличением угла  $\alpha$ . При плоских поверхностях полумуфт и вкладыша ( $\alpha = 180^\circ$ ) погрешность будет минимальна, проще осуществляется доводка сопрягаемых поверхностей (однако увеличивается число вспомогательных деталей). Именно такое решение заложено в конструкции муфты, изображенной на рис. 5.39, точность работы которой примерно в 1,5 раза выше, чем у призматической крестовой муфты  $\alpha = 90^\circ$ . Для получения секундной точности передачи движения сопрягаемые поверхности и шарики таких муфт должны иметь погрешность не более долей микрометра.

На рис. 5.39 представлено устройство крестообразной шариковой муфты, разработанной под руководством Е. Р. Маломеда. Она состоит из двух полу муфт 3, 6, рабочие поверхности которых доведены под пробное стекло, крестообразного вкладыша 7 с доведенными рабочими поверхностями также под пробное стекло, шаров 5 (с погрешностью формы не более 0,1—0,2 мкм), плоских пружин 2, 4, осуществляющих крепление шаров, пружин 8 для силового замыкания полу муфт и свинчиваемых деталей 1, 9 для осевого соединения полу муфт. Муфта позволяет компенсировать достаточно большие перекосы и смещения соединяемых валов. Однако и здесь для

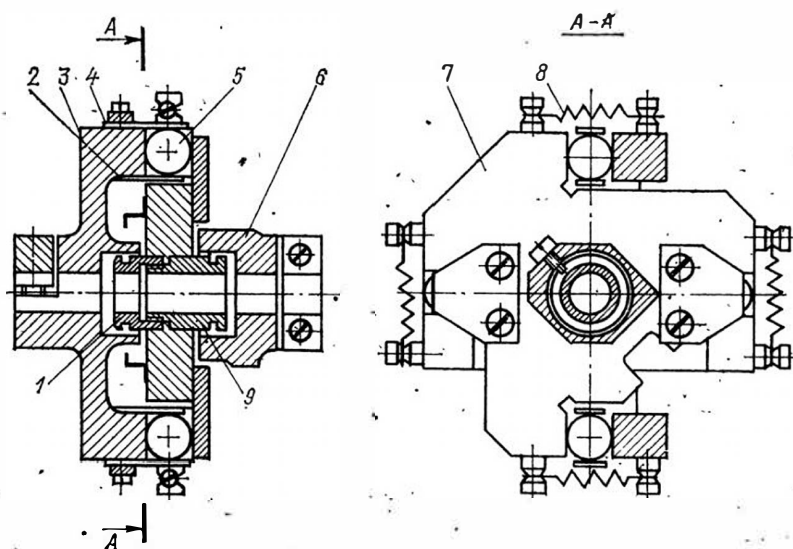


Рис. 5.39. Муфта конструкции ЛОМО им. В. И. Ленина

достижения передачи углового движения с секундной точностью необходима предварительная регулировка соединяемых валов, обеспечивающая их несоосность не более 0,1 мм и перекосы не более 10—15'.

Контроль погрешности расположения соединяемых валов производят обычно с помощью лекальных линейек, индикаторов, оптико-механических устройств. Лекальными линейками (либо плоско-параллельными пластинами) контролируют несоосность валиков, имеющих одинаковый диаметр. Контроль производится на качественном уровне (на просвет) путем приложения линейки к поверхности одного из валиков и наблюдением за погрешностью расположения другого валика относительно поверхности линейки.

Индикатор позволяет производить измерение погрешностей расположения поверхностей валов, имеющих различный диаметр. Для этого на один из валов, принимаемый за базовый, устанавливают струбину, несущую индикатор, измерительный стержень которого замыкается на поверхность другого валика. Если производить вра-

щение трубины вокруг базового валика (или вместе с валиком), то при наличии несоосности соединяемых валов стрелка индикатора будет отклоняться на удвоенное значение эксцентриситета. При смещении трубины вдоль базового валика (производится в двух взаимно перпендикулярных положениях трубины) по изменению показателей индикатора судят о перекосе второго валика относительно базового.

Оптико-механические устройства, как правило, основаны на автоколлимационном измерении погрешностей расположения поверхностей.

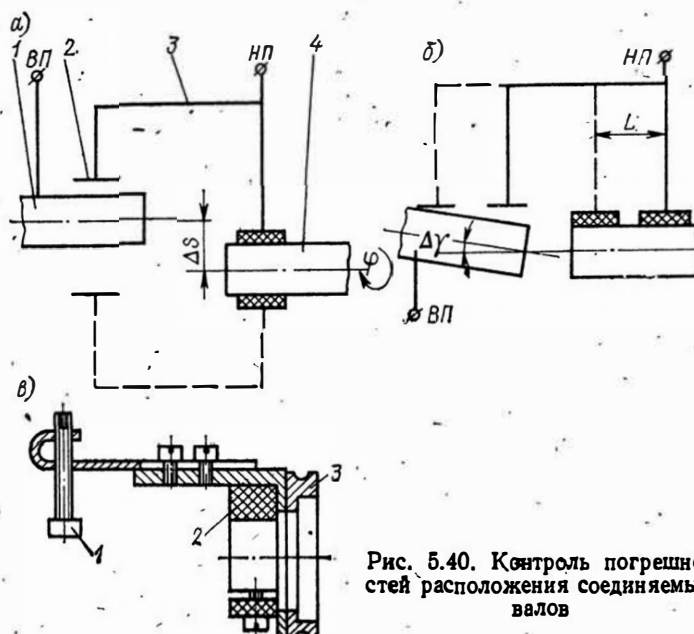


Рис. 5.40. Контроль погрешностей расположения соединяемых валов

Одним из возможных способов, обеспечивающих требуемую точность выставки соединяемых валов, в случае ограниченного пространства является использование приспособления, основанного на принципе емкостного датчика (рис. 5.40). Особенность этого устройства состоит в том, что контролируемая поверхность одного из валов используется для создания емкости, а другая является базой для приспособления. Например, при контроле несоосности (см. рис. 5.40, а) на валик 4 устанавливают приспособление 3 с электродом 2. Электрод подключается к клемме измерителя емкости (например, типа Е8-3) с низким потенциалом НП, а валик 1 подключается к клемме с высоким потенциалом ВП. При вращении валика 4 измеряют изменение емкости  $\Delta C$  между электродом 2 и цилиндрической поверхностью валика 1. Изменение емкости происходит в связи с изменением воздушного зазора между ними, что обусловлено несоосностью  $\Delta S$ . Искомая несоосность валов определяется по формуле:  $\Delta S = K/(2\Delta C)$ , где  $K$  — постоянная, зависящая от геометрии

ческих размеров электрода и габаритных размеров контролируемой поверхности. При контроле перекося валиков (см. рис. 5.40, б) приспособление перемещают по поверхности одного из них и измеряют изменение емкости, обусловленное перекосом  $\Delta\gamma$ . Искомый перекося определяется по формуле  $\Delta\gamma = K/(L \Delta C)$ , где  $L$  — перемещение приспособления.

Эксплуатация этого приспособления показала, что им удобно пользоваться непосредственно при сборке для выставки параллельности и соосности валиков, используя его как индикатор погрешности.

Устройство этого приспособления показано на рис. 5.40, в. Оно состоит из регулируемого электрода 1, шкива для подсоединения электрода к измерителю емкости 3 и призматической струбины 2. Такое устройство может найти применение также для контроля погрешностей размеров и расположения поверхностей изделий, на которые нежелательно воздействовать чувствительным элементом.

### 5.7. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ УСТРОЙСТВ

Чувствительность регулировочных устройств характеризуется минимальным перемещением его рабочего (исполнительного) элемента  $\delta p_{\min} = A_{zp} \Delta z_{k \min}$ , где  $\Delta z_{k \min}$  — минимальное перемещение органа управления;  $A_{zp}$  — передаточная функция (коэффициент), связывающая  $\Delta z$  и  $\delta p$ . Эта характеристика является одной из важнейших для регулировочно-устойчивых и настроечно-выверочных компенсаторов, заложенных в конструкцию прибора. От нее зависит степень возможности и трудоемкость выполнения коррекции.

Так как регулировочные устройства воздействуют на конструктивные параметры прибора, то значение  $\delta p_{\min}$  рассчитывают исходя из требуемой точности компенсации (см. п. 2.2):

$$\delta p_{\min} = \Delta y_{\text{нк max}}/A_q; \quad \delta p'_{\min} = \Delta y_{\text{нк min}}/A_q,$$

где  $A_q$  — передаточная функция (коэффициент), связывающая регулируемый конструктивный параметр прибора и показатель качества;  $\Delta y_{\text{нк max}}$ ,  $\Delta y_{\text{нк min}}$  — максимальное и минимальное значения недокомпенсации влияния погрешностей соответственно.

Минимальное перемещение органа управления зависит от способа управления. При автоматизированном способе управления перемещение органа управления осуществляется с помощью электродвигателей, пьезо- и магнитострикционных двигателей. Значение  $\Delta z_{k \min}$  в этом случае известно достаточно строго и определяется характеристиками двигателя (например, угловым шагом шагового двигателя, пороговым значением изменения размера пьезокерамики и т. д.). При ручном способе управления перемещение органа управления рукоятками и маховиками либо с помощью отверток, шпилек, ключей осуществляется оператором. Здесь значение  $\Delta z_{k \min}$  зависит от большого количества факторов: вида контроля за совершаемым



движением, момента сил сопротивления движению, размера и форм органа управления, индивидуальных особенностей оператора.

Так как управление осуществляется в режиме корректировки, т. е. последовательными приближениями рабочего элемента в требуемое положение при трогании органа управления с места (либо при его медленном движении) с последующей мгновенной остановкой, то значение  $\Delta z_{k \min}$  определяется главным образом запаздыванием реакции руки оператора на сигнал об остановке движения. Это запаздывание объясняется наличием латентного периода сенсомоторной реакции оператора<sup>1</sup>, характеризующего его психофизиологические возможности к осуществлению малых перемещений. При зрительном контроле за результатом движения латентный период меньше и чувствительность движения выше, чем при слуховом и тактильном контроле. Этим объясняется известный факт существенного ухудшения результатов корректировочного движения, выполняемого по команде другого оператора либо только по кинестатическим ощущениям руки (кинестатическая обратная связь дает лучшие результаты только у хорошо тренированных операторов). Роль усилий, развиваемых рукой при выполнении корректировочного движения, размеров и формы рукояток можно рассмотреть на основании зависимости пороговой чувствительности движения рукоятки с накаткой в случае зрительного контроля за результатом движения (см. рис. 4.49). При больших моментах сопротивления движению латентный период реакции возрастает и чувствительность снижается. В то же время при одном и том же моменте сопротивления усилия, развиваемые рукой, уменьшаются с увеличением диаметра рукоятки, благодаря чему чувствительность повышается.

Однако при очень малых моментах сопротивления оператор не чувствует их и латентный период снова возрастает, процесс движения становится менее «тонким» и устойчивым, что объясняется также тремором пальцев, под действием которого происходит самопроизвольное движение рукоятки. Оптимальный момент сопротивления движению составляет 1—2,5 Н·см, сила сопротивления 0,5—1 Н, диаметр рукоятки 40—60 мм.

Отрицательное влияние на значение  $\Delta z_{k \min}$  оказывает перепад моментов и усилий на органе управления, возникающий в момент трогания, из-за неравенства коэффициента трения покоя и трения движения в кинематических парах регулировочного устройства, а также из-за неплавности (колебания моментов и сил) его движения. Это приводит к инерционному движению системы рука—орган (рукоятка) управления.

Значение  $\Delta z_{k \min}$  при одинаковых конструктивных характеристиках регулировочного устройства и условий движения существенно колеблется у различных операторов (до 2—3 и более раз)

<sup>1</sup> Простой сенсомоторной реакцией оператора является реакция, в которой оператор выполняет то или иное движение (например, нажимает на кнопку, прекращает или начинает перемещение рукоятки) в ответ на заранее известный, но внезапно появившийся сигнал с возможной для него максимальной скоростью (см. Б. Ф. Ломов. Человек и техника. М.: Сов. радио, 1966. 464 с).

и зависит от их тренированности. При возрастании тренированности чувствительность движения заметно повышается, а разность значений  $\Delta z_{k \min}$  разных операторов уменьшается. Роль тренированности оператора объясняется появлением навыка в осуществлении «тонких» движений и переключении регулятивных функций со зрения на кинестезию (латентный период реакции при зрительном контроле составляет 0,1—0,15 с, а при кинестатическом у тренированного оператора — около 0,05 с).

Для расчета чувствительности регулировочных устройств с ручным управлением движения в табл. 5.1 приведены ориентировочные значения  $\Delta z_{k \min}$  для нетренированного оператора при зрительном контроле за совершаемым движением.

В качестве передаточной функции  $A_{zr}$ , связывающей  $\Delta z$  и  $\delta p$ , обычно принимают функцию преобразования движения, заложенную в основу регулировочного устройства [18],  $A_{yx} = dy/dx$  либо  $A_{xy} = dx/dy$ , где  $x$  — координата ведущего звена (органа управления);  $y$  — координата ведомого звена (рабочего элемента). Данное решение является правильным только в том случае, когда требуется получить относительно грубое значение  $\delta p_{\min}$ . При малых значениях  $\delta p_{\min}$  (т. е. при высоких требованиях к чувствительности регулировочного устройства) следует учитывать искажения реальной функции преобразования устройства из-за погрешностей изготовления его деталей, влияния сил трения, вибраций. В этом случае значение  $\delta p_{\min}$  определяют с учетом погрешности перемещения его рабочего элемента ( $\Delta p$ ):

$$\delta p_{\min} = A_{yx} \Delta z_{k \min} + \Delta p. \quad (5.18)$$

Так как значение  $\Delta z_{k \min}$  мало, то значение  $\Delta p$  будет определяться при небольшом диапазоне движения не ее мультипликативными, степенными и периодическими (с большим периодом) составляющими, а высокочастотными (нерегулярными) составляющими. Следовательно, чувствительность движения будет зависеть не от погрешностей размеров и положения деталей, их эксцентриситетов, перекосов, теоретических погрешностей устройства, а в первую очередь от погрешностей формы деталей высших кинематических пар, нерегулярных биений шарикоподшипников, местных погрешностей шага винта в винтовых парах, циклической составляющей кинематической погрешности зубчатых передач, смещениями в зазорах кинематических пар из-за влияния сил трения и вибраций.

При ручном управлении движением из-за высокой адаптивности оператора к условиям процесса его выполнения накопленные (регулярные) составляющие погрешности перемещения вообще можно не учитывать, принимая во внимание только местные (нерегулярные) погрешности, действие которых часто бывает ослаблено упомянутой адаптацией. В результате при ручном управлении движением формула (5.18) преобразуется к виду

$$\delta p_{\min} = A_{yx} \Delta z_{k \min} + K \Delta p_{\Sigma} = A_{yx} \Delta z_{k \min} + K \sqrt{\sum_{i=1}^m A_{q_i}^2 \Delta q_{i1}^2}, \quad (5.19)$$

Т а б л и ц а 5.1

| Вид движения   | Тип органа управления, условия движения                                              | $\Delta z_{\text{к min}}$ |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Вращательное   | Рукоятка при оптимальном моменте сопротивления (1 Н·см—2,5 Н·см) с опорой кисти руки | 2—3'                      |
|                | Рукоятка при отличии момента сопротивления от оптимального с опорой кисти руки       | 10—15'                    |
|                | Рукоятка при оптимальном моменте сопротивления без опоры кисти руки                  | 20—30'                    |
|                | Рукоятка при отличии момента сопротивления от оптимального без опоры кисти руки      | 30'—1°                    |
|                | Отвертка при оптимальном моменте сопротивления с опорой кисти руки                   | 30'—1°                    |
|                | Отвертка при отличии момента сопротивления от оптимального без опоры кисти руки      | 2—5°                      |
|                | Шпилька, ключ при оптимальном моменте сопротивления с опорой кисти руки              | 1—2°                      |
|                | Шпилька, ключ при отличии момента сопротивления от оптимального без опоры кисти руки | 3—5°                      |
| Поступательное | Рукоятка при оптимальной силе сопротивления (0,5 Н—1,0 Н) с опорой кисти руки        | 0,02—0,05 мм              |
|                | Рукоятка при отличии силы сопротивления от оптимальной без опоры кисти руки          | 0,1—0,2 мм                |

где  $\Delta p_m$  — местная (нерегулярная) составляющая погрешности перемещения регулировочного устройства;  $\Delta q_m$  — местная первичная погрешность;  $A_q = \partial y / \partial q$  — коэффициент влияния первичной погрешности;  $K$  — коэффициент, учитывающий уменьшение влияния местных погрешностей регулировочного устройства из-за адаптации оператора к условиям наведения, а также того, что при малых значениях  $\Delta z_{\text{к min}}$  может не произойти полного срабатывания местной первичной погрешности;  $m$  — число местных первичных погрешностей.

Значение коэффициента  $K$  зависит главным образом от частоты местных первичных погрешностей, а также от значений  $A_q$  (т. е. скорости измерения  $\Delta p_m$ ).

В настоящее время нет достаточно надежных исследований значений этого коэффициента в зависимости от характеристик местных первичных погрешностей и значений  $A_q$  (т. е. типа и параметров регулировочного устройства и точности его изготовления). Ориентировочно можно принять  $K = 1$  в случае, когда период изменения  $\Delta p_m$  меньше или равен значению  $A_{yx} \Delta z_{\text{к min}}$ ;  $K = 0,5$  — когда этот

период в два раза больше этого значения;  $K = 0,3$  — когда период больше в три раза и т. д.

Рассчитаем чувствительность движения некоторых часто применяемых регулировочных устройств.

**Пример.** Регулировочное устройство основано на винтовом механизме (перемещение объективов по резьбе, наклон зеркал с помощью винтов, сдвиг оправ линз винтами при их центровке и т. п.). Чувствительность перемещения в этом случае согласно выражению (5.19) будет равна

$$\delta\rho_{\min} = (nt \Delta z_{\text{к min}}/2\pi) + K \Delta t_{\text{м}},$$

где  $n$ ,  $t$  — число заходов и шаг резьбы соответственно;  $\Delta z_{\text{к min}}$  — минимальный угол поворота винта;  $\Delta t_{\text{м}}$  — местная погрешность шага винта. При  $n = 1$ ,  $t = 0,5$  мм,  $\Delta z_{\text{к min}} = 1^\circ$ ,  $\Delta t_{\text{м}} = 5$  мкм и  $K = 0,1 \div 0,5$  получаем  $\delta\rho_{\min} \approx 2 - 4$  мкм. Из приведенного выражения и расчета следует, что при обеспечении достаточно малых поворотов винта либо при малых значениях его рабочего шага (что обеспечивается, например, с помощью дифференциальных винтов) чувствительность перемещения определяется главным образом местной погрешностью шага. Известно, что местная погрешность шага даже прецизионных винтов достигает значений  $2 - 3$  мкм, поэтому для повышения чувствительности регулировочного устройства с винтовой парой влияние этой погрешности уменьшают путем введения в него дополнительного масштабного преобразователя (например, рычажного).

**Пример.** Рассмотрим еще один пример. Регулировочное устройство основано на винто-рычажной передаче (см. рис. 1.5). Здесь чувствительность перемещения рабочего элемента устройства (без учета влияния зазора и погрешности формы в опоре рычага) будет равна

$$\delta\rho_{\min} = nt \Delta z_{\text{к min}} r_2 / (r_1 2\pi) + K \sqrt{(r_2 \Delta t_{\text{м}} / r_1)^2 + (\Delta h_1 r_2 / r_1)^2 + \Delta h_2^2},$$
 где  $r_2/r_1$  — соотношение длин плеч рычага;  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$  — погрешности формы (шероховатость) опорных поверхностей рычагов. Так как погрешности  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  довольно легко могут быть доведены (шлифовкой, полировкой и т. п.) до долей микрометра, то чувствительность винто-рычажного устройства примерно в  $r_1/r_2$  раз выше винтового. Например, при тех же параметрах винтового механизма, значениях  $\Delta z_{\text{к min}}$  и  $r_2/r_1 = 1/5$   $\delta\rho_{\min} \approx (0,5 - 1)$  мкм.

**Пример.** Регулировочное устройство основано на червячной передаче. В этом случае чувствительность поворота червячного колеса

$$\delta\rho_{\min} = (n \Delta z_{\text{к min}} / Z) + K f'_{i0} / r,$$

где  $n$  — число заходов червяка,  $Z$  — число зубьев червячного колеса,  $f'_{i0}$  — допуск на местную кинематическую (циклическую) погрешность червячной передачи,  $r$  — радиус делительной окружности червячного колеса. Указать значение коэффициента  $K$  в приведенной формуле весьма затруднительно вследствие того, что  $f'_{i0}$  является комплексной величиной, содержащей гармонические составляющие различных частот. В связи с этим оценка чувствительности движения червячной (и других зубчатых передач) оценивается по составляющим местной кинематической погрешности передачи, обусловленным погрешностью профиля зубьев, приняв значение  $K = 0,1 \div 0,3$  (зависит от шага местных выступов профиля)  $\delta\rho_{\min} = (n \Delta z_{\text{к min}} / Z) + K \sqrt{(f'_{i2}/r)^2 + (f'_{i1}/r)^2}$ , где  $f'_{i2}$ ,  $f'_{i1}$  — допуски на погрешности профилей зуба колеса и витка червяка по нормам плавности соответственно.

Для червячной передачи, выполненной по 7-й степени точности и имеющей модуль 0,5;  $n = 1$ ;  $Z = 60$ , при  $\Delta z_{\text{к min}} = 10'$  получаем  $\delta\rho_{\min} = 10/60 + + 0,1 \cdot 10^3 \sqrt{(9/15)^2 + (12/15)^2} \approx 30'$ .

При проектировании регулировочных устройств наряду с обеспечением необходимого масштаба преобразования движения от органа управления до рабочего элемента ( $A_{yx}$ ) требуется снижение местных первичных погрешностей (или их влияния), оказывающих доминирующее воздействие на плавность и равномерность движения. Для регулировочных устройств многократного использования целесообразно предусматривать регулировку момента сопротивления движению для создания его оптимального значения.

Для учета влияния первичных погрешностей на те или иные показатели качества ОП и расчета компенсаторов необходимо найти передаточные функции, связывающие первичную погрешность с вызываемым частичным влиянием. Вывод соответствующих расчетных формул обычно производят аналитическим и графо-аналитическим методами: дифференцированием функции преобразования сигнала (функции, связывающей информативный параметр  $x$  входного сигнала или объекта с информативным параметром  $y$  выходного сигнала), разложением функции преобразования в ряд; геометрическим методом, преобразованием исходной схемы; построением плана малых перемещений; векторно-матричным методом и т. д.

Рассмотрим основные методы на примерах нахождения передаточных функций некоторых первичных погрешностей в устройствах, рассмотренных выше.

**Метод дифференцирования функции преобразования сигнала** основан на том, что функция преобразования поочередно дифференцируется по входящим в нее конструктивным параметрам, имеющим первичные погрешности. В устройстве дальномера для измерения параллактического угла  $x$  (см. рис. 1.5) угол  $y$  связан с углом поворота винта и конструктивными параметрами следующей зависимости:

$$y = \frac{r_2 \kappa p}{f' r_1 2\pi} x, \quad (\text{П1})$$

где  $r_1$ ,  $r_2$  — длины плеч рычага;  $\kappa$ ,  $p$  — число заходов и шаг резьбы винта соответственно;  $f'$  — фокусное расстояние сдвигаемой линзы.

Дифференцируя это выражение по соответствующим параметрам, имеющим первичные погрешности, получим:

$$\Delta y_{\Delta f'} = -\frac{r_2 \kappa p x}{f'^2 r_1 2\pi} \Delta f' = -\frac{y}{f'} \Delta f'; \quad \Delta y_{\Delta r_2} = \frac{\kappa p x}{f' r_1 2\pi} \Delta r_2 = \frac{y}{r_2} \Delta r_2;$$

$$\Delta y_{\Delta r_1} = -\frac{\kappa p r_2 x}{f' r_1^2 2\pi} \Delta r_1 = -\frac{y}{r_1} \Delta r_1.$$

Метод дифференцирования функции преобразования является наиболее простым, однако его невозможно применять для нахождения передаточных функций погрешностей нулевых параметров (перекосов, зазоров, погрешностей форм, деформаций, биений), например, для определения влияния зазора в шарнире рычага, погрешностей формы поверхностей и перекоса опорных площадок рычага (см. рис. 1.5). С известным ограничением этот метод применяют и в случае нахождения передаточных функций первичных погрешностей, значения которых носят переменный нерегулярный и смешанный характер. Так, например, передаточная функция погрешности шага винта рассматриваемого устройства  $\Delta y_{\Delta p} = \frac{r_2 \kappa x}{f' r_1 2\pi} \Delta p = \frac{y}{p} \Delta p$ , най-

денная дифференцированием выражения (П1), правильна только для накопленной погрешности шага винта (обусловленной постоянным отклонением шага резьбы от номинала), а для местной (нерегулярной) погрешности шага это выражение практически не может быть использовано. Так как погрешность шага винта приводит к погрешности перемещения конца винта  $\Delta l_{\Delta p} \approx \Delta p$ , то передаточная функция этой погрешности имеет вид

$$\Delta y_{\Delta p} = [r_2 / (f' r_1)] \Delta p.$$

Метод дифференцирования нельзя применить в том случае, когда в функции преобразования сигнала отсутствуют конструктивные параметры, от погрешностей которых определяются передаточные функции (например, для параллелограмма механизма, изображенного на рис. 5.18, и муфты на рис. 5.37—5.38).

**Метод разложения функции преобразования** в ряд наиболее часто применяют для нахождения теоретических погрешностей устройств, обусловленных заменой точных нелинейных функций преобразования сигнала их приближенным линейным выражением. В схеме автоколлиматора (см. рис. 2.1) точная и приближенная функции преобразования, связывающие угол  $y$  поворота зеркала с углом  $x$  поворота шкалы, соответственно равны:

$$y_t = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{\kappa p}{f' 2\pi} x; \quad (\text{П2})$$

$$y_n = \frac{\kappa p}{4f'\pi} x, \quad (\text{П3})$$

где  $\kappa, p$  — число заходов и шаг резьбы винтового механизма соответственно;  $f'$  — фокусное расстояние объектива.

Разность между точной функцией и приближенной функцией, положенной в основу работы автоколлиматора, представляет собой теоретическую погрешность и определяется разложением функции в степенной ряд (ограничиваются первыми двумя членами разложения):

$$\Delta y_t = \frac{1}{2} \left[ \frac{\kappa p x}{f' 2\pi} - \frac{1}{3} \left( \frac{\kappa p x}{f' 2\pi} \right)^3 + \dots \right] - \frac{\kappa p x}{4f'\pi} = -\frac{1}{6} \left( \frac{\kappa p x}{f' 2\pi} \right)^3 = -\frac{4}{3} y^3.$$

Аналогично были найдены, например, теоретические погрешности механизма тонкой наводки типа Мейера (см. п. 3.2), рычажных механизмов (см. п. 5.3), а также значения недокомпенсации этих погрешностей.

**Геометрический метод** основан на геометрическом сопоставлении реального и номинального элементов прибора, отличающихся друг от друга рассматриваемой первичной погрешностью. Процесс нахождения передаточной функции в этом случае включает в себя графическое построение, выявляющее первичную погрешность, и аналитическое решение полученной геометрической фигуры. Геометрическим методом обычно находят передаточные функции погрешностей нулевых параметров.

На рис. 4.37 изображено два положения центра деления штрихов лимба: номинальное  $O_1$ , совпадающее с осью вращения, и реальное  $O_2$ , смещенное на величину эксцентриситета  $\Delta e$  шкалы. Разложение этого вектора на скалярные составляющие по осям  $V$  и  $U$  позволяют получить выражение для погрешности отсчета по лимбу

$$\Delta\varphi_{\Delta e} = -\frac{\Delta U_{\Delta e}}{R} = \frac{-\sin\theta}{R} \Delta e,$$

где  $R$  — рабочий радиус лимба;  $\theta$  — направление эксцентриситета. Исходя из геометрического построения реального и номинального положений поверхности пленки кадра диапроектора (см. рис. 4.30),

выводится выражение (4.17), положенное в основу устройства подфокусировки кадра. Геометрические построения реальных положений подвижных деталей в кинематических парах вращательного и поступательного движений позволяют определить степень влияния зазоров на точность их работы (см. рис. 5.20, б и 5.24).

**Метод преобразования исходной схемы устройства** применяют в тех случаях, когда невозможно использовать ни метод дифферен-

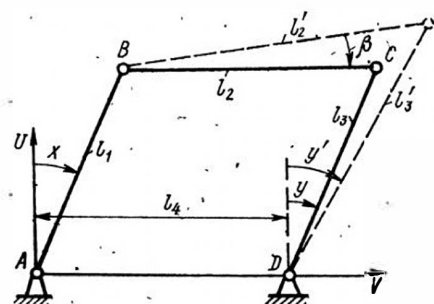


Рис. П1. Схема параллелограммного механизма

цирования функции преобразования из-за отсутствия в ней конструктивных параметров, ни геометрический метод. Суть этого метода заключается в таком преобразовании исходной схемы устройства, которое позволяет ввести конструктивные параметры в функцию преобразования. Для преобразованного устройства передаточные функции погрешностей определяют методом дифференцирования, а затем осуществляют переход к исходной схеме.

Найдем передаточные функции погрешностей размеров кривошипа ( $\Delta l_1$ ), шатуна ( $\Delta l_2$ ), коромысла ( $\Delta l_3$ ) и стойки ( $\Delta l_4$ ) параллелограммного механизма (см. рис. 5.18, а). Функция передачи угла поворота ( $x$ ) кривошипа на поворот ( $y$ ) коромысла равна единице:  $y = x$ ;  $l_1 = l_3$ ;  $l_2 = l_4$ . Преобразуем параллелограмм в шарнирный четырехзвенник (рис. П1) с конструктивными параметрами  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ ,  $\beta$ . Спроектировав замкнутый контур четырехзвенника на ось  $V$ , получим выражение

$$\sin y' = 1/l_3 (l_1 \sin x + l_2 \cos \beta - l_4). \quad (\text{П4})$$

Выразив выражение (П4) относительно  $y'$  (либо прямо дифференцируя его), находим методом дифференцирования функции передачи движения по конструктивным параметрам  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  и  $l_4$  соответству-

ющие формулы для погрешностей углового положения ведомого звена:

$$\Delta y'_{\Delta l_1} = \left( \frac{1}{l'_3} \frac{\sin x}{\cos y'} \right) \Delta l_1; \quad \Delta y'_{\Delta l_2} = \left( \frac{1}{l'_3} \frac{\cos \beta}{\cos y'} \right) \Delta l_2;$$

$$\Delta y'_{\Delta l_3} = - \left( \frac{1}{l'_3} \frac{\sin y'}{\cos y'} \right) \Delta l_3; \quad \Delta y'_{\Delta l_4} = - \left( \frac{1}{l'_3 \cos y'} \right) \Delta l_4.$$

Осуществляя обратный переход от четырехзвенника к параллелограмму, для которого  $x = y = y'$ ;  $\beta = 0$ ;  $l_2 = l'_2 = l_4$  и  $l_1 = l'_3 = l_3$ , получим:

$$\Delta y_{\Delta l_1} = \frac{1}{l_3} \operatorname{tg} y \Delta l_1; \quad \Delta y_{\Delta l_2} = \frac{1}{l_3 \cos y} \Delta l_2;$$

$$\Delta y_{\Delta l_3} = - \frac{1}{l_3} \operatorname{tg} y \Delta l_3; \quad \Delta y_{\Delta l_4} = - \frac{1}{l_3 \cos y} \Delta l_4.$$

**Метод плана малых перемещений** основан на построении планов скоростей и малых перемещений элементов анализируемого устройства вследствие тех или иных первичных погрешностей. Рассмотрим порядок нахождения передаточных функций погрешностей кривошипа и шатуна рассмотренного выше параллелограмма (см. рис. П1).

Погрешность длины кривошипа ( $\Delta l_1$ ) приводит к тому, что шарнир  $B$  параллелограмма переместится в направлении  $AB$ , а шарнир  $C$  — по дуге окружности радиуса  $l_3$ . Построим план скоростей, позволяющий найти связь между перемещениями шарниров  $B$  и  $C$  параллелограмма (рис. П2, а). Из полюса  $P$  откладываем вектор скорости  $V_B$  шарнира  $B$  (параллельный направлению  $AB$ ) и вектор скорости  $V_C$  шарнира  $C$  (перпендикулярный к  $CD$ ). Концы векторов замыкает вектор относительной скорости  $V_{CB}$  (перпендикулярный к  $BC$ ). Из треугольника скоростей находим, что  $V_C = V_B \operatorname{tg} y$ . Далее от плана скоростей переходим к плану малых перемещений. Для этого выбираем такой отрезок времени  $t$ , в течение которого шарнир  $B$ , двигаясь со скоростью  $V_B$ , переместится на величину  $\Delta l_1$ . Тогда шарнир  $C$  за тот же отрезок времени переместится на величину  $\Delta S_C = V_C t = V_B \operatorname{tg} y t = \operatorname{tg} y \Delta l_1$ . Погрешность углового положения ведомого звена (коромысла) будет:

$$\Delta y_{\Delta l_1} = \frac{\Delta S_C}{l_3} = \frac{1}{l_3} \operatorname{tg} y \Delta l_1.$$

Из плана скоростей (рис. П2, б) после перехода к плану малых перемещений аналогично находим угловую погрешность положения коромысла из-за погрешности длины шатуна ( $\Delta l_2$ ):

$$\Delta y_{\Delta l_2} = \Delta S_C / l_3 = 1 / (l_3 \cos y) \Delta l_2.$$

**Векторно-матричный метод** получил широкое распространение при решении задач юстировки зеркально-призмных систем и нахождении передаточных функций погрешностей угломерных прибо-

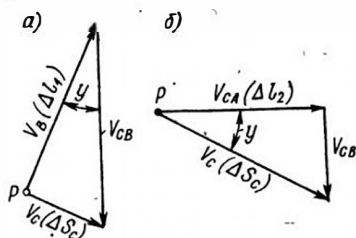


Рис. П2. Планы скоростей и перемещений



ров [32], например, передаточные функции погрешностей подвижного зеркала (см. п. 4.5) и погрешностей юстировки зеркально-призмённых компенсаторов нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования (см. п. 4.8).

Рассмотрим порядок нахождения векторно-матричным методом влияния коллимационной погрешности теодолита — отклонения от

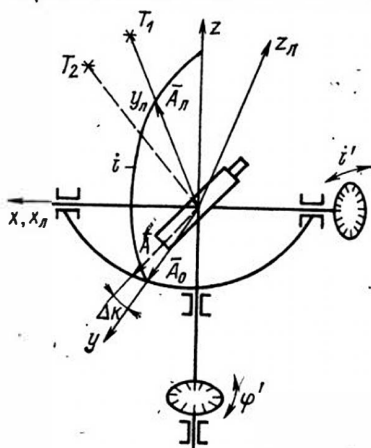


Рис. ПЗ. Схема теодолита

перпендикулярности на угол  $\Delta\kappa$  визирной трубы к горизонтальной оси качания на погрешность измерения горизонтальных  $\Delta\varphi$  и вертикальных  $\Delta i$  углов. На рис. ПЗ изображена схема теодолита, вертикальная ось вращения которого совпадает с осью  $z$  прямоугольной системы координат  $x, y, z$ , горизонтальная ось вращения совпадает с осью  $x$ , а визирная ось зрительной трубы, которая должна быть перпендикулярна к горизонтальной оси качания (совпадать с осью  $y$ ) и направлена по орту  $\bar{A}_0$ , повернута вокруг оси  $z$  на угол  $\Delta\kappa$  и направлена по орту  $\bar{A}$ .

Для орта  $\bar{A}$  можно записать следующее матричное выражение:

$$\bar{A} = S_{\Delta\kappa}^{-1} \bar{A}_0 = \begin{pmatrix} \cos \Delta\kappa & \sin \Delta\kappa & 0 \\ -\sin \Delta\kappa & \cos \Delta\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \Delta\kappa \\ \cos \Delta\kappa \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{П5})$$

где  $S_{\Delta\kappa}^{-1}$  — транспонированная матрица поворота орта  $\bar{A}_0$  на угол  $\Delta\kappa$  вокруг оси  $z$ ;  $\bar{A}_0$  — матрица, соответствующая орту номинального направления визирной оси, совпадающей с осью  $y$ .

Для орта  $\bar{A}_l$  направления визирной оси зрительной трубы теодолита на точку визирования  $T_1$  справедливо следующее матричное выражение:

$$\bar{A}_l = S_i S_{\Delta\varphi} S_{i'}^{-1} \bar{A} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{П6})$$

$$S_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i & \sin i \\ 0 & -\sin i & \cos i \end{pmatrix};$$

$$S_{\Delta\varphi} = \begin{pmatrix} \cos \Delta\varphi & -\sin \Delta\varphi & 0 \\ \sin \Delta\varphi & \cos \Delta\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$S_{i'}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i' & -\sin i' \\ 0 & \sin i' & \cos i' \end{pmatrix},$$

где  $S_i$  — матрица перехода от системы осей местности  $x, y, z$  к лучевой системе  $x_{\text{л}}, y_{\text{л}}, z_{\text{л}}$ , направление оси  $y_{\text{л}}$  которой совпадает с направлением орта  $\vec{A}_{\text{л}}$ ;  $S_{\Delta\varphi}$  — матрица поворота визирной трубы вокруг вертикальной оси теодолита для перевода визирной линии в плоскость начального меридиана;  $S_i^T$  — транспонированная матрица поворота визирной трубы вокруг горизонтальной оси качания на угол  $i'$  для визирования на точку  $T_1$ .

Последовательным перемножением матриц получаем:

$$\begin{pmatrix} \sin \Delta\kappa \cos \Delta\varphi - \sin \Delta\varphi \cos i' \cos \Delta\kappa \\ \cos i (\sin \Delta\varphi \sin \Delta\kappa + \cos \Delta\varphi \cos i' \cos \Delta\kappa) + \sin i \sin i' \cos \Delta\kappa \\ -\sin i (\sin \Delta\varphi \sin \Delta\kappa + \cos \Delta\varphi \cos i' \cos \Delta\kappa) + \cos i \sin i' \cos \Delta\kappa \end{pmatrix} \approx \\ \approx \begin{pmatrix} \Delta\kappa \cos \Delta\varphi - \sin \Delta\varphi \cos i' \\ \cos i (\Delta\kappa \sin \Delta\varphi + \cos \Delta\varphi \cos i') + \sin i \sin i' \\ -\sin i (\Delta\kappa \sin \Delta\varphi + \cos \Delta\varphi \cos i') + \cos i \sin i' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{П7})$$

Так как значение вертикального угла  $i'$ , отсчитанного по лимбу горизонтальной оси качания трубы теодолита отличается от истинного значения вертикального угла  $i$  на  $\Delta i$  ( $i' = i + \Delta i$ ), то, исходя из выражения (П7), с учетом малости угла  $\Delta\varphi$  можно записать

$$\Delta\kappa - \Delta\varphi (\cos i \cos \Delta i - \sin i \sin \Delta i) \approx \Delta\kappa - \Delta\varphi \cos i + \\ + \sin i \Delta\varphi \Delta i \approx \Delta\kappa - \Delta\varphi \cos i = 0,$$

откуда

$$\Delta\varphi = \Delta\kappa / \cos i = \Delta\kappa \sec i. \quad (\text{П8})$$

Для определения погрешности вертикального угла из выражения (П7) запишем

$$-\sin i \Delta\varphi \Delta\kappa - \sin i (\cos i \cos \Delta i - \sin i \sin \Delta i) + \\ + \cos i (\sin i \cos \Delta i + \cos i \sin \Delta i) \approx \\ \approx -\sin i \Delta\varphi \Delta\kappa + \Delta i (\sin i^2 + \cos i^2) = 0.$$

Отсюда с учетом формулы (П8) будем иметь

$$\Delta i = \sin i \Delta\varphi \Delta\kappa = \tg i \Delta\kappa^2. \quad (\text{П9})$$

Из выражений (П8) и (П9) следует, что коллимационная погрешность теодолита вызывает погрешности первого порядка малости при измерении горизонтальных углов и второго порядка при изменении вертикальных углов, не превосходящих  $85^\circ$ .

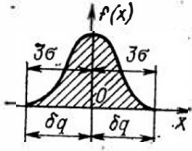
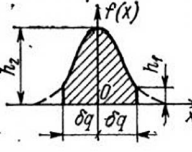
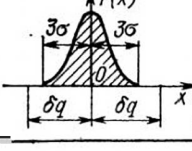
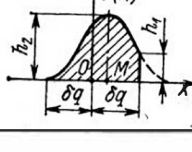
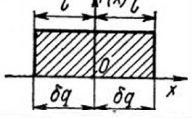
При измерении углов между двумя произвольными точками  $T_1(\varphi_1, i_1)$  и  $T_2(\varphi_2, i_2)$  погрешности измерения горизонтальных и вертикальных углов из-за  $\Delta\kappa$  будут составлять:

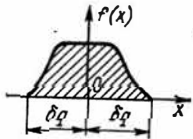
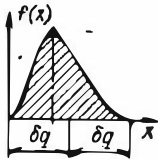
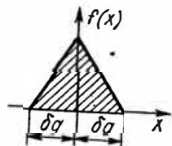
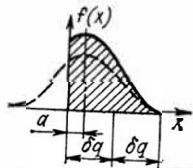
$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_{1,2} &= (\sec \varphi_1 - \sec \varphi_2) \Delta\kappa; \\ \Delta i_{1,2} &= (\tg i_1 - \tg i_2) \Delta\kappa^2. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П10})$$

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ  
АСИММЕТРИИ ( $\alpha_q$ ) И ОТНОСИТЕЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ ( $\kappa_q$ )  
ПЕРВИЧНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ**

Коэффициенты  $\alpha_q$  и  $\kappa_q$  используются как при расчете компенсаторов, так и допустимых значений первичных погрешностей. Коэффициент  $\alpha_q$  входит в выражение для определения коэффициента  $C_p$ , учитывающего систематическую составляющую частичного влияния первичной погрешности. Коэффициент  $\kappa_q$ , учитывающий вид закона рассеяния первичной погрешности и соотношение поля рассеяния с полем допуска, используется при расчете вероятных полей рассеяния частичных влияний с помощью коэффициента  $\kappa_p$ . В табл. П1 представлены значения коэффициентов  $\alpha_q$  и  $\kappa_q$  для типовых законов распределения случайных первичных погрешностей.

**Т а б л и ц а П1**

| Тип распределения                                                             | Кривая распределения                                                                | $\alpha_q$                   | $\kappa_q$                   | Примечание                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Закон Гаусса с полем рассеяния $\pm 3\sigma$ , совпадающим с полем допуска    |    | 0                            | 1                            | $\sigma$ — среднее квадратическое отклонение;<br>$\delta q$ — половина поля допуска |
| Закон Гаусса с полем рассеяния, симметрично выходящим за поле допуска         |    | 0<br>0<br>0<br>0             | 1,21<br>1,26<br>1,44<br>1,55 | При $h_1/h_2$ :<br>0,07<br>0,17<br>0,26<br>0,44                                     |
| Закон Гаусса с полем рассеяния, расположенным симметрично внутри поля допуска |   | 0<br>0<br>0<br>0             | 0,6<br>0,7<br>0,8<br>0,9     | При $3\sigma/\delta q$ :<br>0,6<br>0,7<br>0,8<br>0,9                                |
| Закон Гаусса с полем рассеяния, односторонне выходящим за поле допуска        |  | 0,25<br>0,31<br>0,40<br>0,47 | 1,17<br>1,18<br>1,20<br>1,21 | При $h_1/h_2$ :<br>0,26<br>0,44<br>0,80<br>1                                        |
| Закон равной вероятности                                                      |  | 0                            | 1,73                         | —                                                                                   |

| Тип распределения                             | Кривая распределения                                                              | $\alpha_q$              | $\kappa_q$                   | Примечание                                      |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| Композиция закона Гаусса и равной вероятности |  | 0<br>0<br>0<br>0        | 1,10<br>1,19<br>1,38<br>1,49 | $l/3\sigma$<br>0,667<br>1,0<br>2,0<br>3,0       |
| Закон Релея                                   |  | -0,28                   | 1,14                         | —                                               |
| Закон Симпсона                                |  | 0                       | 1,22                         | —                                               |
| Закон модуля нормального рассеяния            |  | -0,38<br>-0,46<br>-0,50 | 1,27<br>1,22<br>1,20         | $a$ — смещение от нуля моды исходного рассеяния |

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ОП

Одним из эффективных приемов, используемых для повышения качества ОП, является изменение конструкции и схемы проектируемого прибора по сравнению с прототипом или первоначальным решением. Критический анализ аналога следует начинать с проверки его соответствия с общим принципом конструирования, несоблюдение которых, как правило, ухудшает те или иные показатели качества изделий.

Рассмотрим кратко принципы конструирования элементов и функциональных устройств ОП, часть из которых более подробно изложена в работах [18,54].

**Совместная обработка рабочих и базовых элементов деталей.** С точки зрения точности расположения рабочих элементов (РЭ) относительно базовых (БЭ) предпочтительной является такая конструкция детали, которая позволяет обеспечить их совместную

технологическую обработку (за одну установку). Например, конструкция оправы линз фотообъектива, изображенная на рис. П4, б, предпочтительней конструкции оправы прототипа (рис. П4, а), так как оба рабочих элемента под линзы и базовые поверхности здесь могут быть обработаны за одну установку.

**Совмещение рабочих элементов деталей в соединениях.** При конструировании соединений предпочтительной является конструкция, позволяющая осуществлять контакт сопрягаемых деталей по их рабочим элементам. В этом случае происходит объединение рабочего и базового элементов присоединяемой детали, уменьшается размерная цепь и повышается точность расположения рабочего элемента соединения относительно базового элемента.

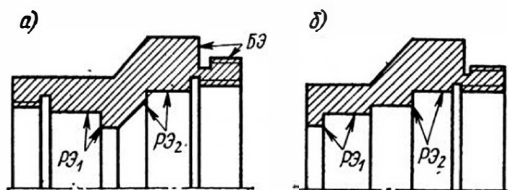


Рис. П4. Конструкции оправ линз фотообъектива

Конструкция соединения зеркала 1 с кронштейном 2, изображенная на рис. П5, б, позволяет более точно ориентировать отражающую поверхность зеркала относительно базы, чем конструкция, изображенная на рис. П5, а.

**Статическая определенность соединений (отсутствие избыточного базирования в соединении деталей).** Придание материальным телам определенного и строго фиксированного положения в пространстве называют базированием. При базировании происходит отнятие лишних степеней свободы присоединяемой детали относительно базовой в их соединении. Базирование называют избыточным, когда лишние степени свободы присоединяемой детали отняты более одного раза, т. е. когда для отнятия лишней степени свободы наложена более чем одна связь. Соотношение между оставшимися степенями свободы ( $n$ ) и числом наложенных связей ( $m$ ) должно быть:  $n + m = 6$ .

Для выявления избыточных (или недостаточных) связей ( $q$ ) в соединении используют следующую формулу [18]:

$$q = n + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=5} P_{\kappa} \kappa - 6, \quad (\text{П11})$$

где  $P_{\kappa}$  — класс элементарной пары контакта, определяющий число степеней свободы, отнимаемых парой (например, при контакте по точке  $P_1 = 1$ , при контакте по линии  $P_2 = 2$ , при контакте по плоскости  $P_3 = 3$ , при контакте цилиндрической поверхности валика

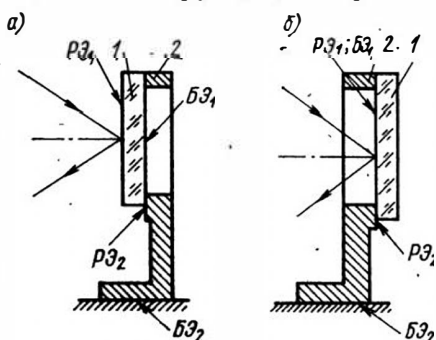


Рис. П5. Конструкция крепления зеркала

с цилиндрическим или призматическим подшипником  $P_4 = 4$ , для контакта конус—конус, винт—гайка  $P_5 = 5$ );  $\kappa$  — число пар данного класса.

Например, для соединения ползуна 1, перемещаемого вдоль оси  $y$ , с направляющими цилиндрическими стержнями 2 и 3 (рис. П6, а) получаем:  $q = 1 + 4 \cdot 2 - 6 = 3$ . Эта конструкция имеет избыточное базирование (три избыточных связи), в результате чего может произойти заклинивание ползуна, его деформация, а также будет затруднена сборка пары.

Конструкция ползуна, изображенная на рис. П6, б, свободна от этих недостатков:  $q = 1 + 4 \cdot 1 + 1 \cdot 1 - 6 = 0$ . Соединение корпуса микрообъектива 2 с тубусом 1 по резьбовой и цилиндрическим поверхностям может привести к избыточности базирования по осям  $x$  и  $y$ . Чтобы этого не произошло, следует более точную посадку поставить на центрирующие цилиндрические поверхности, а резьбовое соединение выполнить с большим гарантированным зазором.

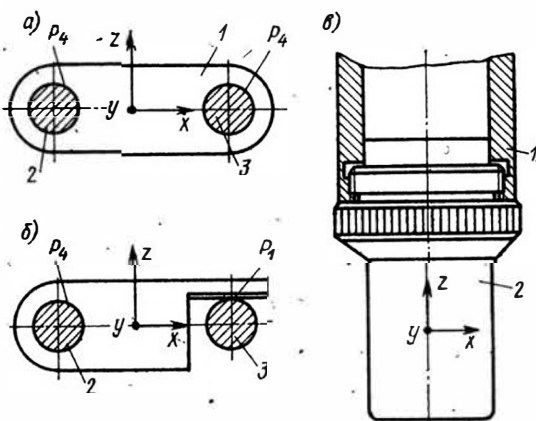


Рис. П6. Базирование деталей в соединениях

**Геометрическая определенность контакта пар в соединении.** Этот принцип заключается в опре-

деленности формы и положения контакта сопрягаемых поверхностей. Реальные поверхности деталей имеют макро- и микропогрешности формы. В результате детали контактируют друг с другом не по линиям и поверхностям, а по пятнам (площадкам) неопределенной формы, размеры и положения которых в сопряжении также неопределенны. Эта неопределенность снижает точность расположения присоединяемой детали и несущую способность базовой детали. Наибольшее влияние на точность оказывает неопределенность расположения пятен контакта.

На рис. П7, а изображено соединение зеркала 1 с оправой 2 с помощью трёх угольников. Из-за погрешностей формы сопрягаемых поверхностей зеркала и оправы их контакт будет происходить не по плоскости, а по трем площадкам 3, расположение которых может быть произвольным в пределах сопрягаемых поверхностей. В результате возникает объемная деформация зеркала под действием сил со стороны угольников и реакций со стороны оправы, приводящая к ухудшению качества изображения. Соединение, изображенное на рис. П7, б, обладает определенностью расположения площадок контакта благодаря специальным выборкам (либо прокладкам) на оправе. Здесь возникает только контактная деформация зеркала

В пределах контактирующих зон, не приводящая к ухудшению качества изображения.

На рис. П8, а, б изображены различные варианты соединения оси с подшипником с отсутствием (рис. П8, а) и наличием (рис. П8, б) определенности положения контактирующих поверхностей.

**Ограничение смещений в соединении деталей.** Согласно этому принципу поверхности, ограничивающие смещение присоединяемой детали относительно базовой, следует располагать перпендикулярно

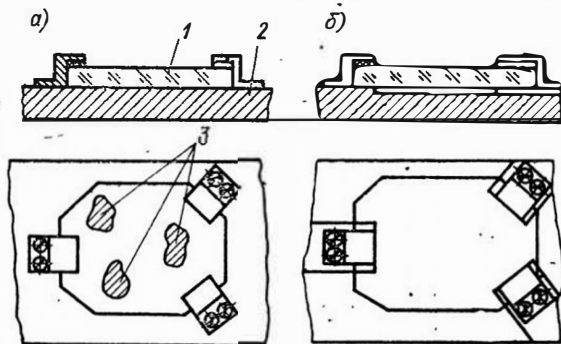


Рис. П7. Конструкции крепления зеркала

к направлению ограничиваемого смещения. Погрешность расположения ползуна вдоль оси  $x$  из-за погрешности  $\Delta q$  (погрешности соответствующего размера или формы поверхности) и реакция

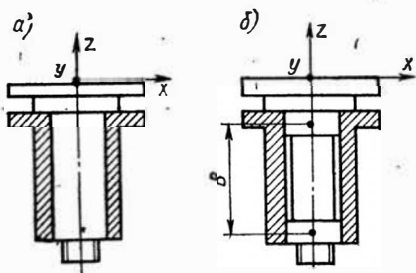


Рис. П8. Конструкции осей

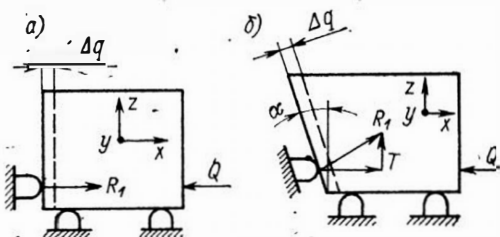


Рис. П9. Ограничение смещения ползуна

со стороны опоры в случае соблюдения принципа (рис. П9, а) будут равны:  $\Delta x_{\Delta q} = \Delta q$ ;  $R = Q$ , где  $Q$  — замыкающая сила.

В случае несоблюдения принципа (рис. П9, б)  $\Delta x_{\Delta q} = (1/\cos \alpha) \Delta q$ ;  $R = (1/\cos \alpha) Q$ .

Таким образом, можно заключить, что несоблюдение принципа ограничений смещения приводит к потере точности и ухудшению силового режима соединения (увеличению реакции и появлению вредной составляющей  $T$ ). Ухудшается также и технологичность изготовления деталей, имеющих дополнительный конструктивный параметр (угол наклона). Отсюда можно сделать вывод, что, например, цилиндрические направляющие вращательного движения (оси)

лучше конических; направляющие поступательного движения Т-образного типа лучше направляющих типа «ласточкин хвост»; точность кулачкового механизма тем выше, чем меньше у него угол давления; точность передачи движения винтового механизма с трапецеидальной резьбой винта и прямоугольной резьбовой гайки должны быть выше, чем у винтового механизма с остроугольной резьбой.

Нарушение этого принципа приводит, например, к тому, что при фиксации положения подвижной каретки 1, несущей проекционную систему универсального измерительного-микроскопа УИМ-23, винтом 2 происходит значительное ее смещение вдоль оси  $x$  (рис. П10). Более правильно для направляющих типа «ласточкин хвост» осуществлять фиксацию в направлении оси  $y$ , для которого принцип ограничения смещений выполняется.

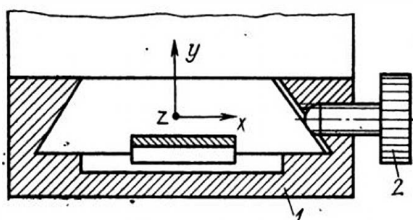


Рис. П10. Фиксация ползуна

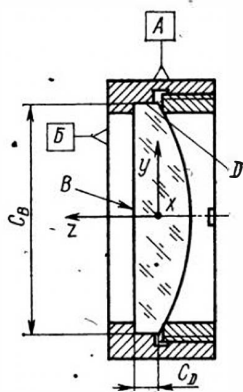


Рис. П.11. Крепление плоско-выпуклой линзы

**Ограничение поворотов в соединениях.** Согласно этому принципу связи, накладываемые базовой деталью на присоединяемую, должны располагаться на возможно большем базисе. В этом случае погрешность углового положения присоединяемой детали при прочих равных условиях будет наименьшей. Например, для ползуна (см. рис. 5.22) ограничение поворота относительно оси  $y$  является предпочтительным по сравнению с ограничением поворота относительно осей  $x$  и  $z$ , так как  $B_y > B_{xz}$ . По этой же причине угловое положение плоско-выпуклой линзы относительно осей  $x, y$  будет определяться контактом по поверхности  $B$ , а не  $D$  (рис. П11). Положительными с точки зрения соблюдения этого принципа являются также выборки сопрягаемых деталей, осуществляемые для обеспечения принципа геометрической определенности соединений (см. рис. П8, б).

**Силовое замыкание соединений.** Силовое замыкание следует осуществлять так, чтобы линия действия замыкающей силы проходила через зону (площадку) контакта. В этом случае возникающая реакция и сила не образуют изгибающего момента, действующего на присоединяемую и базовые детали. Примерами выполнения этого принципа могут служить крепление зеркала (см. рис. П7, б), а также известный способ крепления тонкой линзы, опирающейся на три выступа оправы с помощью резьбового и упругого колец, имеющих три выступа, которые расположены против выступов оправы.



**Принцип Аббе.** Этот принцип характеризуется отсутствием компараторной погрешности и заключается в ограничении продольного или поперечного (иногда и того и другого) вылетов (расстояний) рабочего элемента — соединения, конструктивной цепи, узла относительно базового элемента. Это позволяет уменьшить опасное смещение рабочего элемента при возникновении поворотов деталей, обусловленных действием погрешностей, благодаря уменьшению соответствующего расстояния до мгновенного центра поворота. Примерами нарушения и соблюдения данного принципа могут служить конструкции поперечного и продольного компараторов (см. рис. 1.6), расположения марок подвижной сетки окулярного микрометра (см. рис. 5.21).

**Кратчайшая цепь преобразования.** Так же как и кратчайшая размерная цепь позволяет получить более высокую точность размера замыкающего звена, кратчайшая цепь преобразования, содержащая минимальное число преобразователей, позволяет получить более высокую точность функционирования устройства. Теодолит, содержащий всего одну кинематическую (осевую) пару, существенно превосходит по точности стереотрубу, кинематическая цепь которой содержит кроме осевой пары отсчетную червячную передачу. Спиральный окулярный микрометр позволяет получить более высокую точность, чем винтовой окулярный микрометр, цепь преобразования которого включает большее число элементарных преобразователей.

**Отсутствие избыточных связей и местных подвижностей механизмов приборов.** Избыточные связи в механизмах приборов приводят к объемным деформациям звеньев, увеличению трения в кинематических парах, затрудняют сборку и регулировку механизмов. Местные подвижности менее опасны, они обусловлены дополнительной к рабочей подвижностью некоторых звеньев. Наличие избыточных связей и местных подвижностей в механизмах можно определить на основании анализа их структуры<sup>1</sup>, используя выражение, аналогичное (П11):

$$n + \sum_{\kappa=1}^{\kappa=5} P_{\kappa} \kappa - 6w = q, \quad (\text{П12})$$

где  $n$  — число ведущих звеньев механизма;  $P_{\kappa}$  — класс кинематической пары;  $\kappa$  — число пар данного класса;  $w$  — число подвижных звеньев.

Проанализируем выполнение принципа для винтового механизма, изображенного на рис. П12. Соединение винта с подшипником представляет собой пару 5-го класса, соединения винта с гайкой и гайки с направляющими типа «ласточкин хвост» являются также парами 5-го класса. В результате из выражения (П12) получим:  $q = 1 + 1 + 5 \cdot 3 - 6 \cdot 2 = 1 + 4$ . Следовательно, механизм имеет четыре избыточные связи. Для соблюдения принципа следует изменить, например, конструкцию направляющих гайки, превратив ее в пару 1-го

<sup>1</sup> Подробно методика структурного анализа механизмов изложена И. М. Долгинским в работе [37].

класса (отнять только разворот вокруг оси  $x$ ), тогда  $q = 1 + 5 \cdot 2 + 1 \cdot 1 - 6 \cdot 2 = 0$ .

На рис. П13 изображена схема параллелограммного механизма. Если все его шарниры выполнить в виде пар 5-го класса, то  $q = 1 + 5 \cdot 4 - 6 \cdot 3 = +3$ . Если же соединение шатуна с кривошипом выполнить в виде пары 3-го, а с коромыслом — 4-го классов, получим  $q = 1 + 5 \cdot 2 + 4 \cdot 1 + 3 \cdot 1 - 6 \cdot 3 = 0$ , т. е. в результате этих действий мы получим конструкцию без избыточных связей и местных подвижностей.

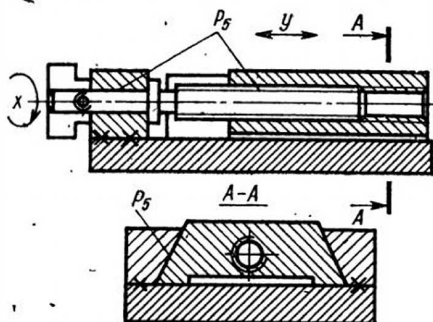


Рис. П12. Конструкция винтового механизма

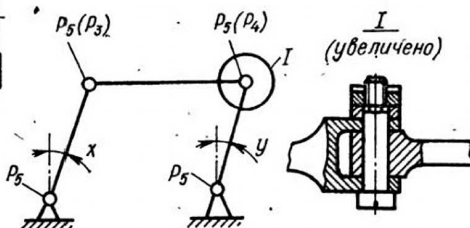
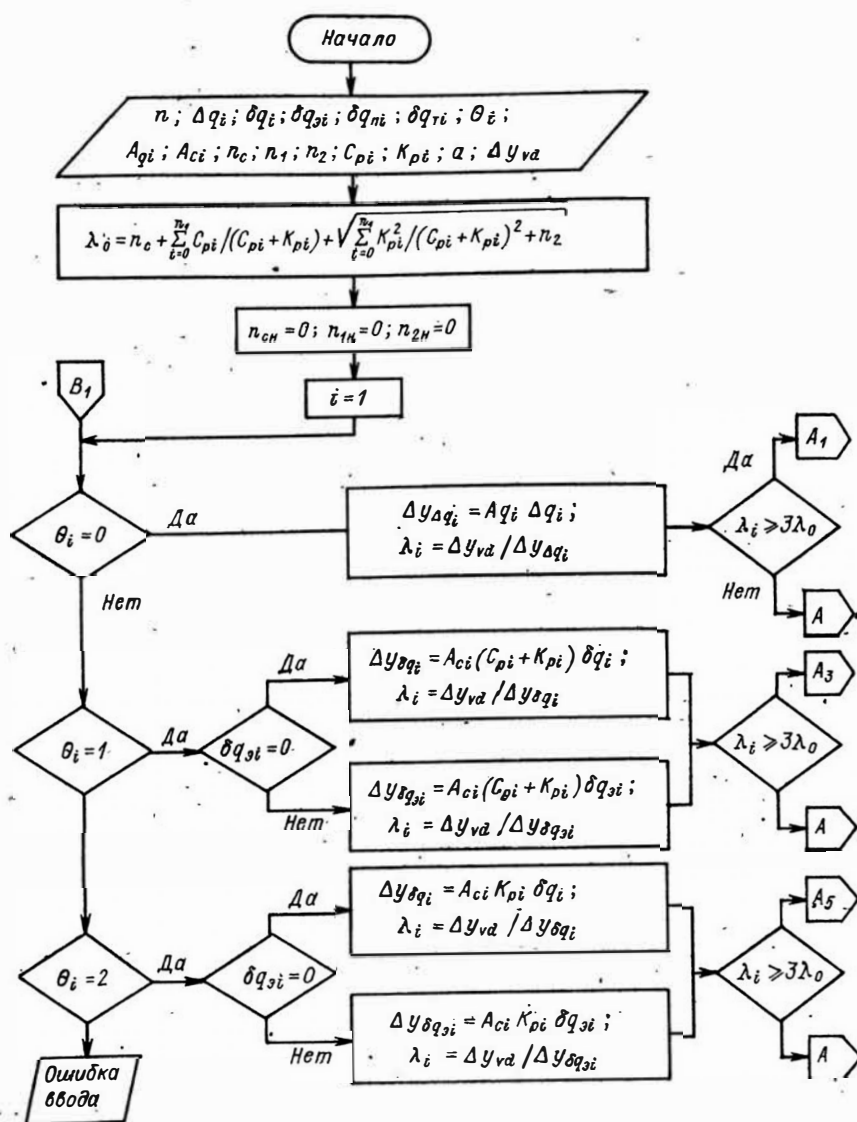


Рис. П13. Схема параллелограмма

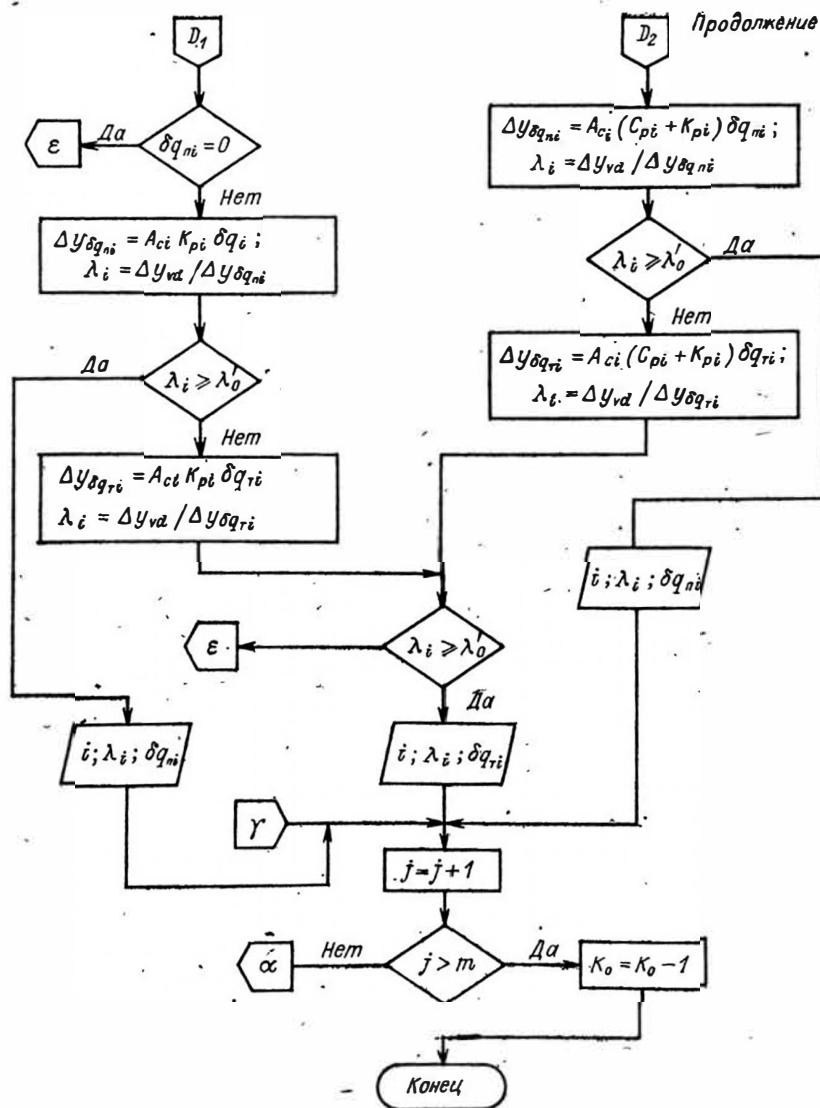
**Наибольшие масштабы преобразования.** Согласно этому принципу функциональные элементы, осуществляющие наибольший масштаб преобразования, следует ставить в конце (для устройств, работающих на редукцию) либо в начале (для устройств, работающих на мультипликацию) цепи элементарных преобразователей. В этом случае суммарная погрешность устройства будет меньше (см. рис. 1.10).

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. СХЕМЫ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КОМПЕНСАТОРОВ

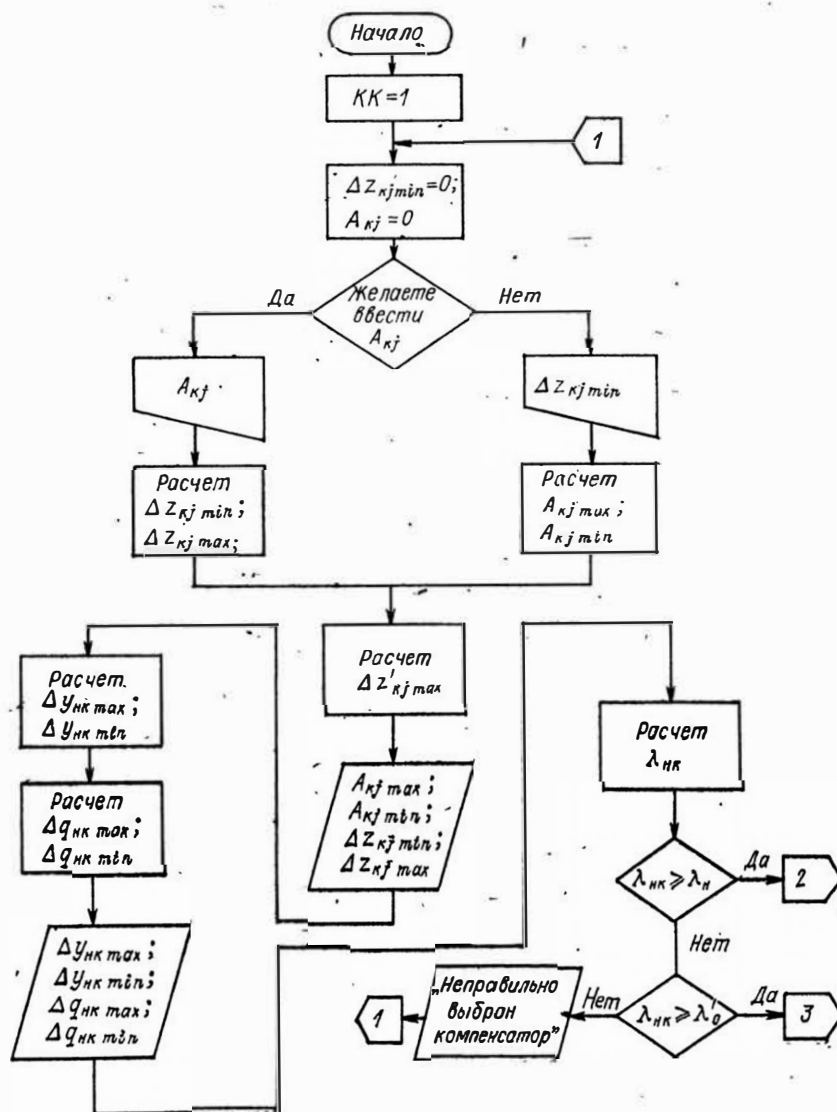
Алгоритм расчета погрешностей, требующих компенсации

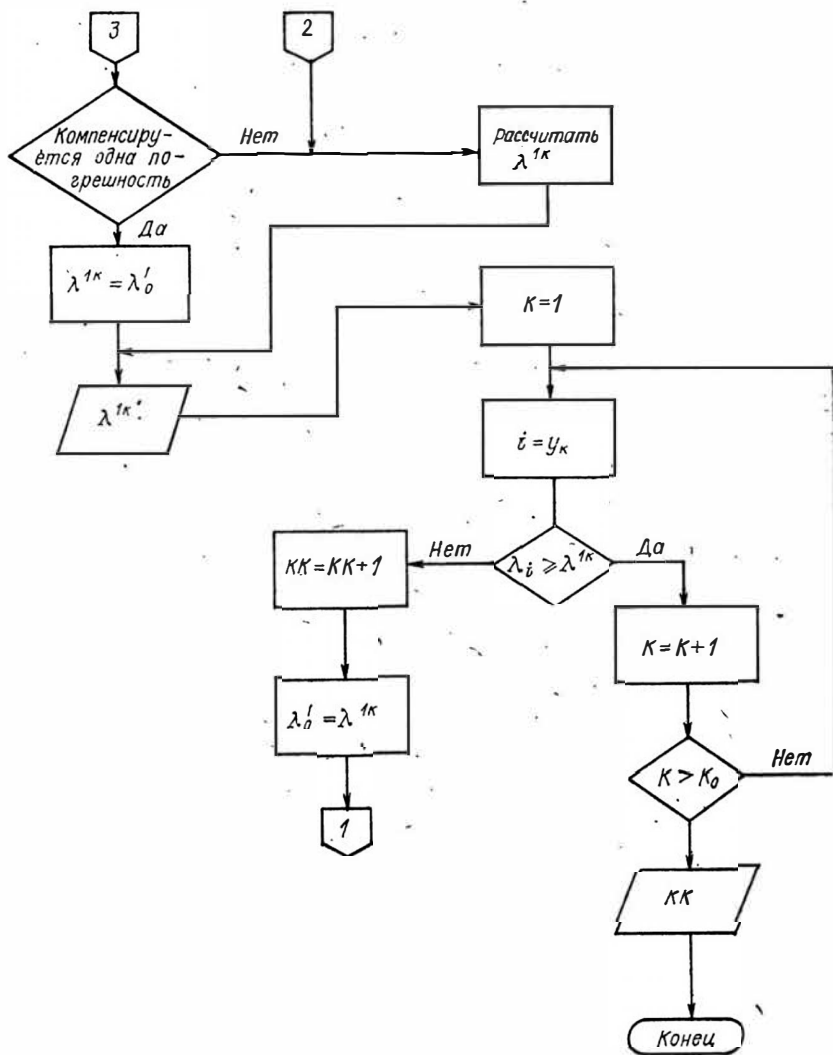






# Алгоритм расчета числа компенсаторов и требований к ним





## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адаптивная оптика/Пер. с англ; Под ред. Э. А. Витриченко. М.: Мир, 1980. 456 с.
2. Алиев Т. М., Сейдель А. Р. Автоматическая коррекция погрешностей цифровых измерительных устройств. М.: Энергия, 1975. 216 с.
3. Анализ влияния погрешностей широкодиапазонного нивелира на точность стабилизации линии визирования/Н. И. Кручинин. — ОМП, № 4, 1984, с. 41—44.
4. Бардин А. Н. Сборка и юстировка оптических приборов. М.: Высшая школа, 1968. 325 с.
5. Браславский Д. А., Петров В. В. Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
6. Влияние эксцентриситета лимбов на точность фотоэлектрических масштабных преобразователей угла типа «Оптосин»/Б. Я. Карасик, М. В. Кормер, Л. Н. Пивоваров — ОМП, 1965, № 5, с. 6—9.
7. Децентрировка. Определение и методы измерения/Ю. А. Степин, Е. А. Васильев. — ОМП, 1974, № 9, с. 46—50.
8. Елисеев С. В. Геодезические инструменты и приборы. М.: Недра, 1973. 302 с.
9. Ельников Н. Т., Дитев А. Ф., Юрсов И. К. Сборка и юстировка оптико-механических приборов. М.: Машиностроение, 1974. 345 с.
10. Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1968. 97 с.
11. Захаров А. И. Новые теодолиты и оптические дальномеры. М.: Недра, 1978. 261 с.
12. Земельман М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств. М.: Изд-во Стандартов, 1972. 199 с.
13. Иваицов А. И. Основы теории точности измерительных устройств. М.: Изд-во Стандартов, 1972. 212 с.
14. Использование норакрила-65 при эластичном креплении линзы в оправе/Н. К. Балаценко, А. С. Галутва, Ю. М. Либик. — ОМП, 1982, № 10, с. 59.
15. Кемпинский М. М. Точность и надежность измерительных приборов. Л.: Машиностроение, 1972. 264 с.
16. Кори Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров/Пер. с англ; Под ред. И. Г. Арамановича. М.: Наука, 1976. 831 с.
17. Кочетов Ф. Г. Нивелиры с самоустанавливающейся линией визирования. М.: Недра, 1969. 128 с.
18. Кулагин В. В. Основы конструирования оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 312 с.
19. Кулагин С. В. Проектирование фото- и киноприборов. М.: Машиностроение, 1976. 304 с.
20. Левицкий М. Я. Корректирующие устройства. Киев: Техника, 1969. 190 с.
21. Мальцев М. Д. Расчет допусков на оптические детали. М.: Машиностроение, 1974. 168 с.
22. Малогабаритный оптический поворотный стол повышенной точности/Б. М. Левин, В. И. Федосов, В. Н. Ляпков. — ОМП, 1978, № 7, с. 28—31.
23. Методика расчета допусков на юстировку оптических систем с помощью передаточных коэффициентов/С. А. Сухопаров, И. М. Долинский. — ОМП, 1967, № 3, с. 1—5.
24. Многоэлементный большой оптический телескоп с управляемой фигурой зеркала/М. И. Гвоздев, Н. А. Димов, Н. Я. Жерноклеев и др. — УФН, т. III, вып. 3, 1973, с. 558—560.
25. Мореходные инструменты/В. В. Григорьев, Д. А. Самохвалов, А. Цурбан и др. М.: Морской транспорт, 1955. 382 с.
26. Нивелир с широкодиапазонной стабилизацией линии визирования без установочного уровня/Г. К. Бесчастный, М. В. Раик, В. М. Соловьев. В кн.: Инженерная геодезия (Тр. ВАГО). Л.: 1976, с. 3—11.
27. Ортоскопия фотограмметрических объективов/М. М. Русинов, В. Г. Афремов, А. Ш. Шахвердов и др. М.: Недра, 1976. 176 с.



28. Основы методики расчета числа компенсаторов погрешностей в приборе/ С. М. Латыев. — ОМП, 1979, № 3, с. 11—15.

29. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. 312 с.

30. Подшипниковые подвески чувствительных элементов в маркшейдерско-геодезических приборах/Г. К. Бесчастный, М. В. Райк, Э. Г. Рейшер. В кн.: Инженерно-геодезическая практика в строительстве (Тр. ВАГО). Л.: 1974, с. 4—16.

31. Повышение качества оптических приборов компенсацией погрешностей/ С. М. Латыев — ОМП, 1981, № 3, с. 3—7.

32. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982. 238 с.

33. Погарев Г. В. Оптические юстировочные задачи. Л.: Машиностроение, 1974. 223 с.

34. Пороговая чувствительность движения точных механизмов с ручным управлением/В. В. Кулагин, С. М. Латыев. — ОМП, 1973, № 5, с. 16—20.

35. Применение отражательных дифракционных решеток в интерференционных схемах для измерения линейных перемещений/Г. Н. Рассудова, Ф. М. Герасимов — Оптика и спектроскопия, 1963, т. 14, вып. 3, 4, с. 406—413.

36. Современные дифракционные решетки/Ф. Г. Герасимов — ОМП, 1965, № 10, с. 33—49.

37. Справочник конструктора оптико-механических приборов/Под. ред. В. А. Панова. Л.: Машиностроение, 1980. 614 с.

38. Средства для линейных измерений/Б. М. Сорочкин, Ю. З. Тененбаум, А. П. Курочкин и др. Л.: Машиностроение, 1978. 263 с.

39. Стандартизация и качество машин/Ф. Х. Бурумкулов, А. И. Кубарев, Б. М. Морозов и др. М.: Изд-во Стандартов, 1975. 223 с.

40. Сухопаров С. А. Сборка и юстировка морских оптических дальномеров. М.: Оборонгиз, 1961. 180 с.

41. Тайц Б. А. Точность и контроль зубчатых колес. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.

42. Тимошенко С. П. Соппротивление материалов. Ч. I. М.: Физматгиз, 1960. 379 с.

43. Устройства для автоматической фокусировки фото- и киносъемочных аппаратов/М. Я. Шульман — ОМП, 1978, № 3, с. 64—68.

44. Федотов А. И. Автоматизация делительных работ. Л.: Машиностроение, 1969. 319 с.

45. Хилл П. Наука и искусство проектирования/Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 263 с.

46. Цуккерман С. Т. Точные механизмы. М.: Оборонгиз, 1941. 304 с.

47. Черемисин М. С., Ардасенов В. Д., Кольцов В. П. Нивелиры с компенсаторами. М.: Недра, 1978. 142 с.

48. Шарловский Ю. В. Регулировочные устройства приборов и их элементы. М.: Машиностроение, 1976. 311 с.

49. A. Buffington and oth. J. Opt. Soc. Am. 67, 298—303 (1977).

50. A. Buffington and oth. J. Opt. Soc. Am. 67, 304—305 (1977).

51. Goldberg N. Popul. Photogr. vol. 79, N 7, 1976.

52. R. P. Grosso, M. Yellin. J. Opt. Soc. Am. 67, 399—406 (1977).

53. J. W. Hardy, J. E. Lefebvre, C. L. Kolliopoulos. J. Opt. Soc. Am. 67, 360—369 (1977).

54. Krause W. Gerätekonstruktion. VEB Verlag Technik, Berlin, 1982.

55. Latyew S. Feingeratetechnik. 24. Jg. Heft 5/1975.

56. Latyew S. Feingeratetechnik. 31. Jg. Heft 4/1982.

57. Lotmar W. Microtechnik, N 1, 1962.

58. J. E. Pearson, S. Hansen. J. Opt. Soc. Am., 67, 325—333 (1977).

59. Takuso Sato and oth. Appl. Opt., 21, N 10, 1778—1784 (1982).

60. K Uchino and oth. Appl. Opt., 20, N 17, 3077 (1981).

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Предисловие . . . . .                                                                                                  | 3          |
| <b>Глава 1. Методы повышения качества оптических приборов . . . . .</b>                                                | <b>5</b>   |
| 1.1. Характеристики качества оптических приборов . . . . .                                                             | —          |
| 1.2. Погрешности и факторы, влияющие на качество прибора . . . . .                                                     | 7          |
| 1.3. Повышение качества оптических приборов при проектировании . . . . .                                               | 15         |
| 1.4. Методы компенсации погрешностей в оптических приборах . . . . .                                                   | 23         |
| 1.5. Техничко-экономические обоснования выбора метода компенсации . . . . .                                            | 35         |
| <b>Глава 2. Теоретические основы расчета компенсаторов погрешностей в оптических приборах . . . . .</b>                | <b>42</b>  |
| 2.1. Концептуальная и математическая модели компенсации погрешностей . . . . .                                         | 43         |
| 2.2. Методика расчета компенсаторов . . . . .                                                                          | 47         |
| 2.3. Примеры расчетов компенсаторов при проектировании оптических приборов . . . . .                                   | 58         |
| 2.4. Уточнение допустимых значений первичных погрешностей . . . . .                                                    | 68         |
| 2.5. Распределение допуска на показатель качества оптического прибора между его функциональными устройствами . . . . . | 71         |
| <b>Глава 3. Основы компенсации погрешностей оптических приборов . . . . .</b>                                          | <b>73</b>  |
| 3.1. Структурные схемы компенсации погрешностей . . . . .                                                              | 74         |
| 3.2. Компенсация систематических погрешностей . . . . .                                                                | 78         |
| 3.3. Компенсация влияния случайных погрешностей и факторов . . . . .                                                   | 84         |
| <b>Глава 4. Типовые компенсаторы погрешностей оптических функциональных устройств . . . . .</b>                        | <b>88</b>  |
| 4.1. Термокомпенсаторы . . . . .                                                                                       | 89         |
| 4.2. Компенсация децентрировок линз оптических систем . . . . .                                                        | 101        |
| 4.3. Компенсация погрешностей фокусных расстояний объектов, фокусировка изображения . . . . .                          | 113        |
| 4.4. Пересчет оптических систем на плавки стекол и комплектация линз . . . . .                                         | 120        |
| 4.5. Компенсация погрешностей расположения зеркально-призмных систем . . . . .                                         | 122        |
| 4.6. Компенсация погрешностей лимбов . . . . .                                                                         | 130        |
| 4.7. Компенсация погрешностей наведения и считывания . . . . .                                                         | 143        |
| 4.8. Компенсаторы нивелиров с самоустанавливающейся линией визирования . . . . .                                       | 152        |
| 4.9. Адаптивные компенсаторы . . . . .                                                                                 | 161        |
| 4.10. Компенсаторы гнутых телескопов . . . . .                                                                         | 166        |
| <b>Глава 5. Типовые компенсаторы погрешностей механических функциональных устройств . . . . .</b>                      | <b>171</b> |
| 5.1. Компенсаторы погрешностей зубчатых передач . . . . .                                                              | —          |
| 5.2. Компенсаторы погрешностей винтовых механизмов . . . . .                                                           | 181        |
| 5.3. Компенсация погрешностей рычажных механизмов . . . . .                                                            | 187        |
| 5.4. Компенсация погрешностей направляющих . . . . .                                                                   | 196        |
| 5.5. Устройства юстировки источников и приемников излучения . . . . .                                                  | 211        |
| 5.6. Компенсационные муфты . . . . .                                                                                   | 215        |
| 5.7. Чувствительность регулировочных устройств . . . . .                                                               | 220        |
|                                                                                                                        | 247        |

|                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Приложение 1. Методы определения передаточных функций первичных погрешностей . . . . .                                                        | 225 |
| Приложение 2. Коэффициенты относительной асимметрии ( $\alpha_d$ ) и относительного рассеяния ( $\kappa_d$ ) первичных погрешностей . . . . . | 231 |
| Приложение 3. Принципы конструирования элементов и функциональных устройств ОП . . . . .                                                      | 232 |
| Приложение 4. Схемы алгоритмов расчета компенсаторов . . . . .                                                                                | 239 |
| Список литературы . . . . .                                                                                                                   | 245 |

С. М. Латышев

КОМПЕНСАЦИЯ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ  
В ОПТИЧЕСКИХ  
ПРИБОРАХ