

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**В. В. Боженков, Г. М. Шахлевич**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности  
1-36 04 01 «Программно-управляемые электронно-оптические  
системы»*

Минск БГУИР 2018

УДК 681.7.02(076.5)  
ББК 34.96я73  
Б76

Рецензенты:

кафедра телекоммуникационных систем учреждения образования  
«Белорусская государственная академия связи»  
(протокол №9 от 04.04.2017);

кафедра электротехнологии учреждения образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет»  
(протокол №11 от 22.05.2017);

доцент кафедры лазерной техники и технологии  
Белорусского национального технического университета,  
кандидат технических наук, доцент Р. В. Федорцев

**Боженков, В. В.**

Б76      Технология электронно-оптических систем. Лабораторный практикум :  
пособие / В. В. Боженков, Г. М. Шахлевич. – Минск : БГУИР, 2018. –  
79 с. : ил.  
ISBN 978-985-543-383-6.

Составлено в соответствии с учебной программой по дисциплине «Технология электронно-оптических систем» для указанной специальности. Включает в себя лабораторные работы по исследованию технологических процессов сборки, балансировки и юстировки механических узлов и оптических систем, методам контроля параметров оптических деталей и сборочных узлов.

Предназначено для закрепления теоретических знаний студентов, полученных ими на лекциях и в процессе самостоятельного изучения дисциплины, а также приобретения практических навыков.

УДК 681.7.02(076.5)  
ББК 34.96я73

ISBN 978-985-543-383-6

© Боженков В. В., Шахлевич Г. М., 2018  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2018

## Содержание

<b>Лабораторная работа №1</b> БАЛАНСИРОВКА НАКОПИТЕЛЯ НА ЖЕСТКИХ МАГНИТНЫХ ДИСКАХ.....	4
<b>Лабораторная работа №2</b> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ОПТИЧЕСКОГО УЗЛА.....	25
<b>Лабораторная работа №3</b> ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА .....	42
<b>Лабораторная работа №4</b> ИЗУЧЕНИЕ ДЕЦЕНТРИЧНОСТИ И МЕТОДОВ ЦЕНТРИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	52
<b>Приложение 1</b> ОПИСАНИЕ ПРИБОРА «АГАТ-М» И ПОРЯДОК РАБОТЫ С НИМ .....	59
<b>Приложение 2</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ МИКРОСКОПА С ОКУЛЯРОМ-МИКРОМЕТРОМ.....	73
<b>Приложение 3</b> ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНЫЕ ПРИБОРЫ .....	74

## Лабораторная работа №1

### БАЛАНСИРОВКА НАКОПИТЕЛЯ НА ЖЕСТКИХ МАГНИТНЫХ ДИСКАХ

**Цель работы:** изучить основные термины балансировки вращающихся тел, способы и средства определения и устранения неуравновешенности; ознакомиться с конструкцией накопителей на жестких магнитных дисках и основными методами устранения их дисбалансов; получить навыки работы с прибором вибродиагностики и балансировки «Агат-М»; провести балансировку вращающегося узла накопителя на жестких магнитных дисках с устранением дисбаланса путем добавления корректирующих масс.

#### 1.1. Краткие теоретические сведения

##### 1.1.1. Основные термины балансировки вращающихся тел

Неуравновешенность вращающейся детали или сборочной единицы является причиной появления в изделии при его работе динамических сил, которые дополнительно нагружают опоры, повышают интенсивность износа подшипников, а также вызывают вибрационные явления и связанные с этим усталостные напряжения в деталях.

Неуравновешенность механизмов увеличивает их вибрацию, что ухудшает управляемость, отрицательно влияет на прочность и вредно отражается на здоровье обслуживающего персонала.

Неуравновешенность вращающихся элементов в накопителях на жестких магнитных дисках (винчестерах), помимо повышенного износа опор, может вызвать ошибки чтения и записи, проскальзывание диска, повышенный уровень шума.

Балансировку деталей обычно осуществляют при их изготовлении. Однако после сборки сборочных единиц, в которые входят отбалансированные детали, возникает необходимость повторной их проверки, т. к. смещение одной из деталей, даже в пределах зазоров, установленных чертежом, может вызвать значительную неуравновешенность всей сборочной единицы. В связи с этим в технологических процессах сборки многих изделий балансировка является обязательной операцией.

Единицы измерения дисбалансов и основные понятия технологии балансировки предусматриваются ГОСТ 19534–74.

Объектами балансировки являются *роторы* – любые детали или сборочные единицы, которые при вращении удерживаются своими несущими поверхностями в опорах. По расположению масс относительно опор различают следующие виды роторов:

– консольные, у которых существенная часть массы расположена за одной из крайних опор (вентиляторы, роторы консольных насосов);

- двухконсольные, у которых существенные части массы расположены за обеими крайними опорами (валы с консольным расположением колес);
- межопорные, у которых существенная часть массы расположена между опорами (роторы электродвигателей).

*Неуравновешенность* – состояние ротора, характеризующееся таким распределением масс, которое во время вращения вызывает переменные нагрузки на опорах ротора и его изгиб.

*Дисбалансом  $D_i$*  называют вектор, равный по модулю произведению неуравновешенной массы  $m_i$  на ее расстояние до оси ротора  $e_i$  (эксцентриситет), приложенный в центр этой массы и направленный от оси. В поперечном сечении ротора, содержащем  $D_i$ , выделяют фазу дисбаланса  $\varphi_i$ . Соответственно, единицами дисбаланса являются грамм-миллиметр ( $г \cdot мм$ ) и градус ( $^\circ$ ).

*Момент дисбаланса  $M_{D_i}$*  относительно произвольной точки  $O$  равен векторному произведению дисбаланса  $D_i$  на кратчайшее расстояние  $l_i$  от его линии действия до точки  $O$ , приложенному в этой точке (рис. 1.1).

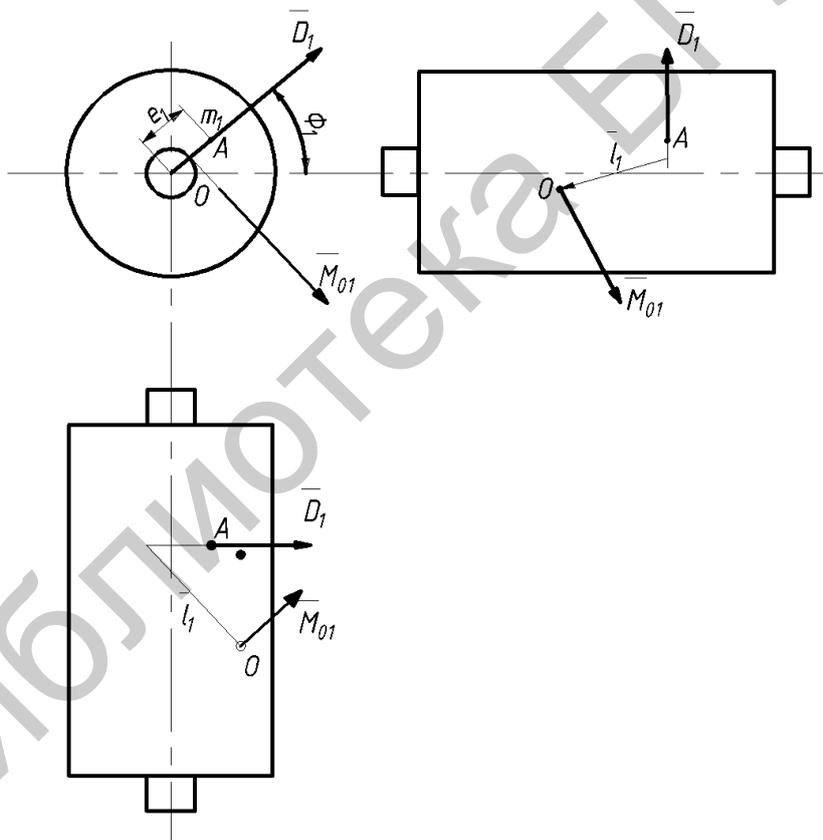


Рис. 1.1. Изображения частного дисбаланса и его момента относительно произвольной точки

Все дисбалансы ротора приводятся к главному вектору  $D_{ст}$  и главному моменту  $M_D$  дисбалансов независимо от причин, вызвавших смещение центра масс с оси вращения: погрешностей получения заготовки, погрешностей механосборочного производства или изменений условий эксплуатации.

Главный вектор дисбалансов  $D_{ст}$  проходит через центр масс и равен произведению массы неуравновешенного ротора  $m_0$  на ее эксцентриситет  $e_{ст}$ .

Различают дисбалансы:

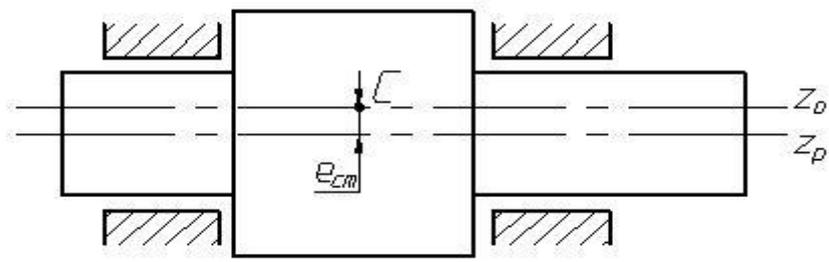
- *начальный*, до корректировки масс;
- *допустимый*, приемлемый по условиям эксплуатации изделия;
- *удельный*, отношение главного дисбаланса к массе ротора ( $г \cdot мм/кг = мкм$ ).

Главный вектор дисбалансов можно также определить как сумму всех векторов дисбалансов ротора, расположенных в различных плоскостях, перпендикулярных оси ротора.

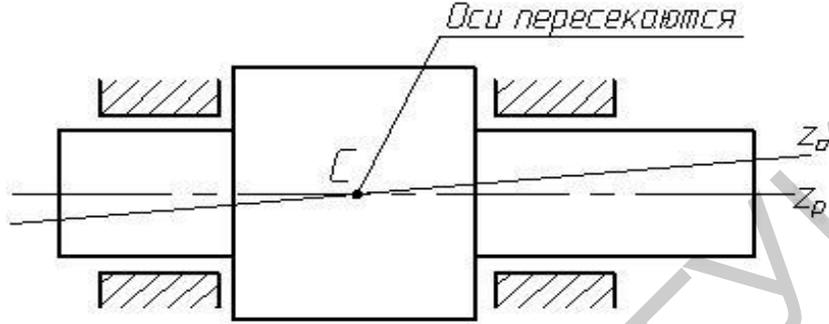
Главный момент дисбалансов  $M_D$  равен геометрической сумме моментов всех частных дисбалансов ротора относительно его центра масс.  $M_D$  перпендикулярен главной центральной оси инерции (центральная ось, относительно которой центробежные моменты инерции тела или системы равны нулю) и оси ротора и вращается вместе с ротором. Главный вектор дисбалансов в плоскостях опор может быть заменен его составляющими (симметричными дисбалансами). Главный момент в тех же плоскостях опор может быть заменен парой сил (кососимметричными дисбалансами).

Выделяют четыре вида неуравновешенности ротора (рис. 1.2). *Статическая неуравновешенность* означает, что ось ротора и его главная центральная ось инерции параллельны; в этом случае главный момент дисбаланса равен нулю. При *моментной неуравновешенности* ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются в центре масс, т. е. главный вектор дисбалансов равен нулю (отсутствует эксцентриситет центра масс ротора). *Динамическая неуравновешенность* – общий случай, когда  $D_{ст}$  и  $M_D$  не равны нулю, ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются не в центре масс или скрещиваются. Случай, когда ось ротора и его главная центральная ось инерции пересекаются не в центре масс ротора, называется *квазистатической неуравновешенностью*, при этом частные дисбалансы ротора лежат в одной плоскости, содержащей ось ротора и его центр масс.

*Балансировкой* называют процесс определения значений и углов дисбалансов и их уменьшение корректировкой масс ротора. Корректировка масс для уменьшения отдельно взятого дисбаланса производится в той плоскости, в которой дисбаланс задан (плоскость коррекции, она же плоскость приведения и измерения дисбаланса, перпендикулярная оси ротора). Добавляемая, уменьшаемая или перемещаемая корректирующая масса создает дисбаланс такого же значения, что и у неуравновешенного ротора, но с углом  $180^\circ$  относительно дисбаланса ротора.



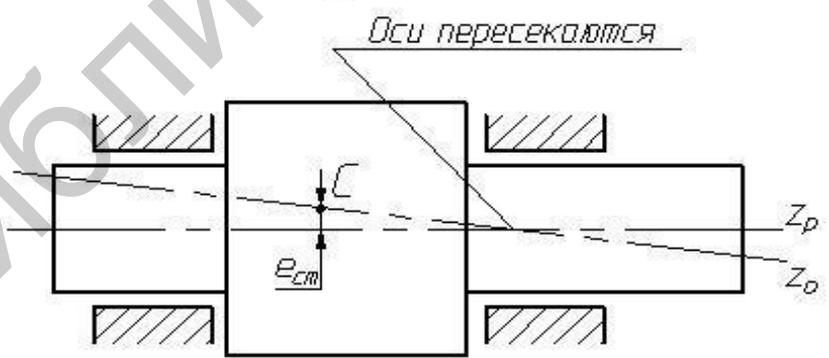
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 1.2. Виды неуравновешенности:  
*a* – статическая; *б* – моментная; *в* – динамическая; *г* – квазистатическая  
 (*C* – центр масс,  $z_p$  – ось ротора,  $z_o$  – главная центральная ось инерции,  
 $e_{cm}$  – эксцентриситет массы ротора)

В соответствии с видом устраняемой неуравновешенности различают следующие виды балансировки:

1. *Статическая* – определяется и уменьшается главный вектор дисбалансов ротора, характеризующий его статическую неуравновешенность. Ее проводят в одной плоскости коррекции, хотя корректирующую массу иногда удобно разносить на несколько параллельных плоскостей.

2. *Моментная* – определяется и уменьшается главный момент дисбалансов ротора, характеризующий моментную неуравновешенность. Проводится не менее чем в двух плоскостях коррекции для уменьшения пары кососимметричных дисбалансов, выражающих главный момент.

3. *Динамическая* – определяются и уменьшаются дисбалансы, характеризующие динамическую неуравновешенность. Динамическую балансировку жесткого ротора достаточно проводить в двух плоскостях коррекции, для гибкого ротора обычно берут более двух плоскостей.

Ротор может быть уравновешен за одну или несколько операций, состоящих из типовых переходов: выявление и определение значения и угла дисбалансов (измерительный переход), преобразование полученных данных в параметры технологического метода, принятого для корректировки масс дисбалансов (переход преобразования), и корректировка (устранение) дисбалансов до заданных значений. В полностью автоматизированном процессе все три перехода осуществляются последовательно в одной машине, линии, агрегате. Балансировочные операции могут выполняться на всех стадиях производственного процесса: в начале обработки заготовки, после завершения всех операций механообработки детали, в процессе сборки любых сборочных единиц, включая изделие (балансируются и детали, и сборочные единицы).

*Точность балансировки* характеризуется следующим произведением:

$$П = e_{\text{ост}} \cdot \omega_3, \text{ мм} \cdot \text{рад/с} , \quad (1.1)$$

где  $e_{\text{ост}}$  – остаточный удельный дисбаланс ротора;

$\omega_3$  – наибольшая частота вращения ротора в условиях эксплуатации.

$$e_{\text{ост}} = D_{\text{ост}}/m_0 , \quad (1.2)$$

где  $D_{\text{ост}}$  – значение главного вектора остаточных дисбалансов;

$m_0$  – масса ротора, т. е. масса всех деталей, которые вращаются в собранном изделии как одно целое.

На основании этого критерия ГОСТ 22061–76 предусматривает 13 классов точности (от 0-го до 12-го). Например, требования к точности балансировки шпинделей шлифовальных станков и гироскопов соответствуют 1-му классу, а для колес автомобилей, бандажей колесных пар достаточно 6-го класса точности. Каждый класс устанавливает наибольшее и наименьшее значения  $П$ , которые образуют геометрическую прогрессию со знаменателем 2,5.

Верхнее значение главного вектора допустимых дисбалансов для ротора, балансируемого в изделии в сборе, определяется по формуле

$$D_{\text{ст доп. верх}} = m_0 \cdot e_{\text{ст табл}} - D_{\text{ст}_3}, \quad (1.3)$$

а для ротора, балансируемого в виде отдельной детали, по формуле

$$D_{\text{ст доп. верх}} = m_0 \cdot e_{\text{ст табл}} - D_{\text{ст}_T} - D_{\text{ст}_3}, \quad (1.4)$$

где  $e_{\text{ст табл}}$  – табличное значение удельного дисбаланса, определяемое для собранного изделия по верхней границе установленного класса точности балансировки и максимальной эксплуатационной частоте вращения его ротора;

$D_{\text{ст}_T}$  – значение главного вектора технологических дисбалансов изделия, ротор которого балансировался не в сборе. Эти дисбалансы возникают при сборке ротора из-за монтажа на него деталей, которые имеют собственные дисбалансы, вследствие отклонения формы и расположения поверхностей и посадочных мест, радиальных зазоров и т. д.;

$D_{\text{ст}_3}$  – значение главного вектора эксплуатационных дисбалансов изделия, возникающих из-за неравномерности износа, релаксации, выжигания, кавитации деталей ротора под влиянием рабочей температуры, неравномерности распределения материала на рабочей поверхности центрифуги, действия шатунных и поступательно движущихся масс в поршневых машинах, за заданный технический радиус или до ремонта, предусматривающего балансировку.

Нижнее значение главного вектора допустимых дисбалансов рассчитывается по следующим формулам:

– для ротора, балансируемого в изделии в сборе:

$$D_{\text{ст доп. ниж}} = m_0 \cdot \frac{e_{\text{ст табл}}}{2,5} - D_{\text{ст}_3}; \quad (1.5)$$

– для ротора, балансируемого в виде отдельной детали:

$$D_{\text{ст доп. ниж}} = m_0 \cdot \frac{e_{\text{ст табл}}}{2,5} - D_{\text{ст}_T} - D_{\text{ст}_3}. \quad (1.6)$$

Для двухопорных роторов (рис. 1.3) верхние и нижние значения допустимых дисбалансов в каждой из двух плоскостей коррекции 1 и 2 определяются по следующим формулам:

$$D_{1 \text{ доп. верх}} = D_{\text{ст доп. верх}} \cdot \left| \frac{l_2 - l_a}{l_2 - l_1} \right|, \quad (1.7)$$

$$D_{2 \text{ доп. верх}} = D_{\text{ст доп. верх}} \cdot \left| \frac{l_a - l_1}{l_2 - l_1} \right|, \quad (1.8)$$

$$D_{1 \text{ доп. ниж}} = D_{\text{ст доп. ниж}} \cdot \left| \frac{l_2 - l_a}{l_2 - l_1} \right|, \quad (1.9)$$

$$D_{2\text{доп. ниж}} = D_{\text{ст доп. ниж}} \cdot \left| \frac{L_a - l_1}{l_2 - l_1} \right|. \quad (1.10)$$

Верхние и нижние значения допустимых дисбалансов в плоскости опор, измерения или приведения определяют по этим же формулам и схемам, подставляя вместо  $l_1$  и  $l_2$  расстояния от опоры  $A$  до соответствующих плоскостей.

При расчете необходимо учитывать, что наибольшие значения дисбалансов  $D_{1\text{доп. верх}}$ ,  $D_{2\text{доп. верх}}$  являются предельными независимо от направления их действия, определяемого видами неуравновешенности ротора (статической, моментной или динамической).

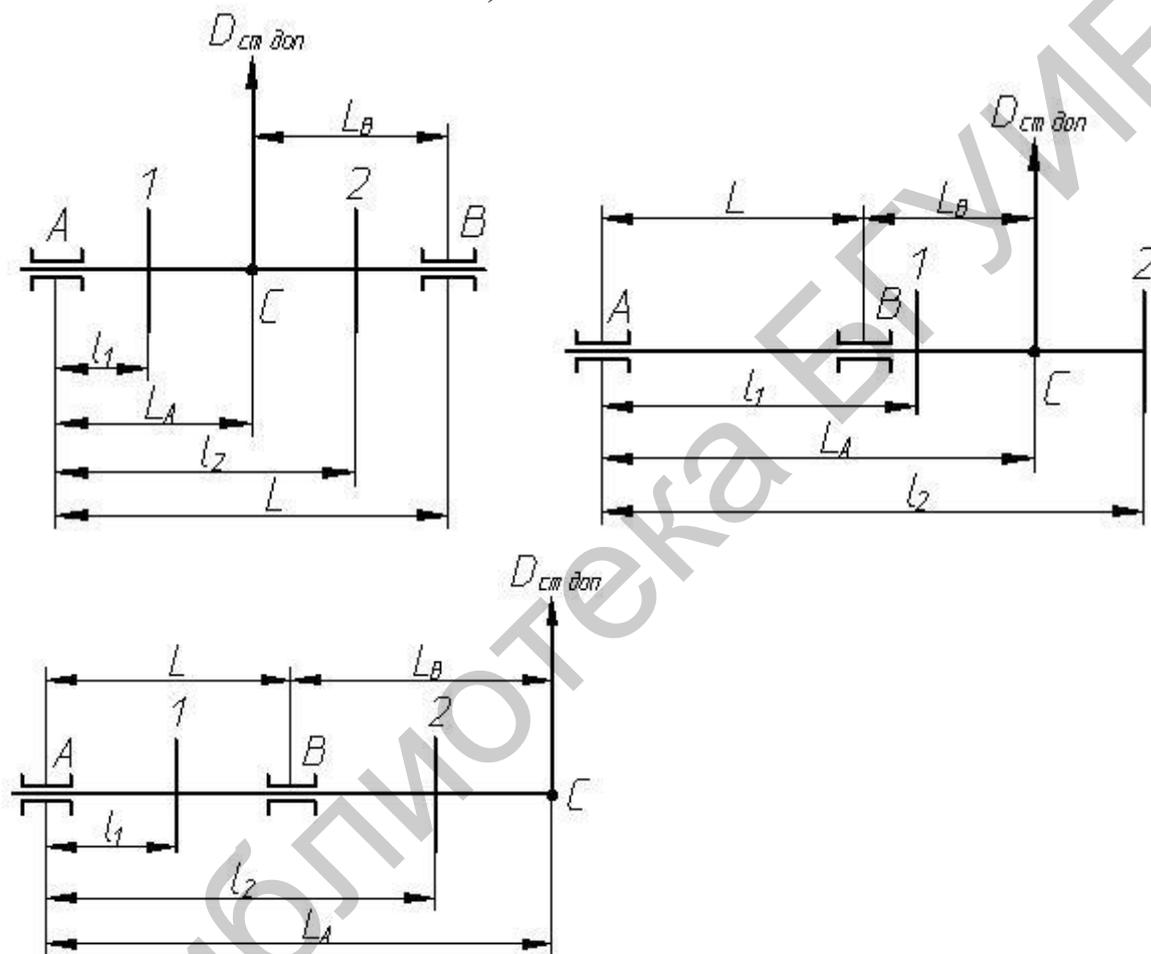


Рис. 1.3. Варианты размещения плоскостей коррекции

для двухопорных роторов:

1, 2 – плоскости коррекции;

A, B – опоры; C – центр масс

Точность балансировки устанавливается техническими требованиями исходя из особенностей конструкции и назначения сборочных единиц и деталей, скорости их вращения, допустимых вибраций машины, необходимой надежности и долговечности, возможных физиологических ощущений оператора, работающего на машине, и др.

Значение допустимого остаточного дисбаланса обычно устанавливается при конструировании изделий и доводке их образцов. Однако в процессе подготовки производства нового изделия вопрос об остаточной неуравновешенности его основных сборочных единиц нередко еще раз прорабатывается в связи с проектированием технологии и выбором необходимого оборудования. Значительное повышение точности балансировки приводит к снижению производительности балансировочного оборудования, кроме того, возрастает стоимость операции, особенно при большой исходной неуравновешенности. В связи с этим чрезмерное сокращение допусков на балансировку экономически невыгодно. Опыт показывает, что для многих изделий частичная неуравновешенность вращающихся масс не ухудшает их эксплуатационных качеств.

## **1.1.2. Балансировочное оборудование и способы устранения дисбалансов**

### **1.1.2.1. Классификация балансировочного оборудования**

Балансировочное оборудование предназначено как для балансировки роторов в собственных подшипниках (балансировка на месте), так и для балансировки путем установки их на балансировочные станки.

Балансировку на месте осуществляют балансировочным комплектом, который может включать измерительный вибропреобразователь, фильтр, индикатор амплитуды колебаний, индикатор угла, индикатор частоты и другие специализированные приборы (анализатор вибрации, разделитель плоскостей, калибратор и др.).

Балансировочное оборудование (станочное) различают по следующим особенностям:

- 1) виду балансировки – для статической и динамической балансировки, последняя в свою очередь бывает моментной и динамической;
- 2) режиму балансировки – в статическом и в динамическом режиме, т. е. с вращением ротора;
- 3) рабочей частоте вращения ротора – дорезонансные, резонансные, зарезонансные (имеется в виду соотношение частоты вращения ротора при балансировке и собственной частоты колебаний системы, состоящей из ротора и паразитной массы, создаваемой станком);
- 4) степени специализации – универсальные, специальные и специализированные;
- 5) расположению оси ротора – горизонтальные и вертикальные;
- 6) степени автоматизации – неавтоматические, полуавтоматические и автоматические;
- 7) числу и специализации рабочих позиций – станки и линии;
- 8) числу степеней свободы ротора (от одной до семи);
- 9) возможности колебаний опор ротора – станки с независимыми опорами и станки с колеблющейся рамой.

Предельные габариты ротора для горизонтальных станков определяются диаметрами ротора (наибольшим над станиной, наибольшими и наименьшими диаметрами вала для приводного ремня) и осевыми размерами (наибольшим и наименьшим расстоянием между цапфами, наибольшим расстоянием от соединительной муфты до середины наиболее удаленного подшипника и наименьшим расстоянием от этой муфты до середины ближайшего подшипника).

Возможности вертикальных станков характеризуются предельными габаритами ротора, включая габариты шпинделя и планшайбы, а также максимальной высотой центра масс ротора.

Для всех станков важными показателями являются диапазон масс балансируемых роторов и максимальный момент инерции ротора относительно оси вала. Наибольшее произведение массы на квадрат радиуса вращения влияет на число включений и остановок (циклов) станка в час, на время разгона ротора до заданной частоты вращения.

Возможности станка характеризуются наибольшим измеряемым на нем дисбалансом для данного ротора и наименьшим достигаемым остаточным дисбалансом – порогом чувствительности станка.

Мерой общей эффективности балансировки на станке служит коэффициент уменьшения дисбаланса (%):

$$k = \frac{D_1 - D_2}{D_1} = 1 - \frac{D_2}{D_1}, \quad (1.11)$$

где  $D_1$  – начальный дисбаланс в данной плоскости коррекции;

$D_2$  – дисбаланс после одной корректировки масс в этой же плоскости.

#### **1.1.2.2. Способы и средства выявления и определения статической неуравновешенности роторов**

Главный вектор дисбалансов ротора, находящегося в покое, под действием силы тяжести создает момент относительно оси или точки подвеса ротора и стремится повернуть ротор так, чтобы центр его масс занял самое низкое положение. На этом принципе основано действие различных средств для выявления и определения статической неуравновешенности в поле сил тяжести: стенов с роликовыми и дисковыми опорами (рис. 1.4) или горизонтальными параллельными призмами (рис. 1.5).

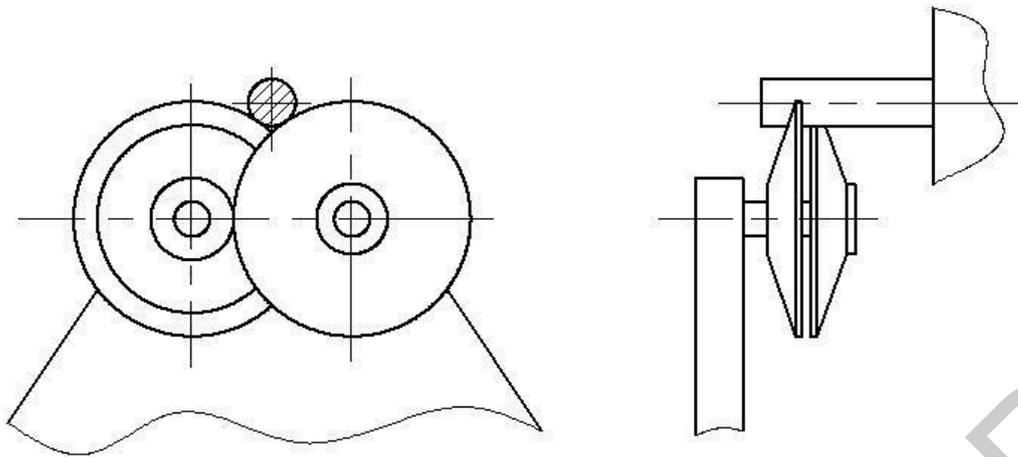


Рис. 1.4. Дисковые опоры стенда для статической балансировки

Ротор, имеющий отверстие, надевается на базовую поверхность оправки без зазора. Базовая поверхность оправки выполняется концентрично с ее поверхностями, перекатываемыми по роликам или дискам. Точность определения «тяжелого» места зависит от массы ротора и от трения между оправкой и опорами. Для снижения трения и повышения точности используют наложение на опоры вибрации или подачу струи воздуха под шейки оправки.

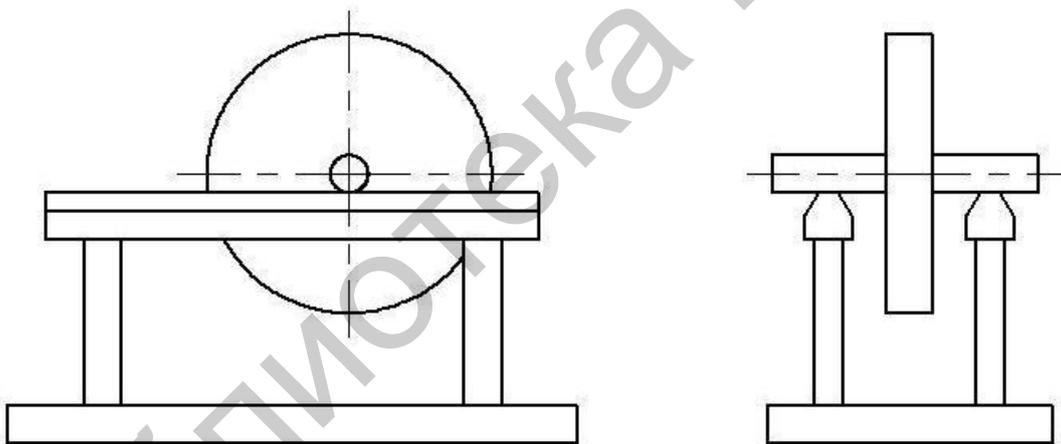


Рис. 1.5. Стенд с горизонтальными параллельными призмами

Другой принцип, на котором основано действие устройств для выявления статической неуравновешенности, заключается в изменении положения центра масс ротора в горизонтальной плоскости при принудительном повороте ротора. Для этого применяют так называемые балансировочные весы. Положение равновесия находят путем перемещения груза при различных угловых положениях ротора, т. е. смещениях центра массы  $S$  ротора на величину  $\pm e_{ст}$  (изменения длины рычага).

Для тяжелых роторов с большим диаметром, обычно не имеющих собственных опор, нахождение эксцентриситета масс заключается в следующем. Ось ротора располагается вертикально, а под действием момента от главного вектора дисбалансов на плече эксцентриситета  $e_{ст}$  происходит поворот или ка-

чание ротора на пяте или шарике, острие, подвесе или платформе-поплавке. По отклонению базовых поверхностей ротора от горизонта судят о его дисбалансе.

Один из способов нахождения статической неуравновешенности заключается в принудительном вращении ротора с регистрацией давления или колебаний (статическая балансировка в динамическом режиме), для чего применяют специальные балансировочные станки.

Сила, вызывающая давление на опоры или колебание системы, определяется по формуле

$$P = m_0 \cdot e_{ст} \cdot \omega^2, \quad (1.12)$$

где  $m_0$  – масса ротора;

$\omega$  – угловая скорость.

Ротор 1, насаженный на оправку шпинделя 2, вращающегося от электродвигателя 3, вызывает колебания системы относительно фиксированной оси (рис. 1.6) или плоскости, связанной со станиной 4 станка, которые фиксируются вибропреобразователем 5. Система ротор – шпиндель – электродвигатель связана со станиной жестко или пружинами 6. В схеме с неподвижными опорами регистрируется давление. Вибропреобразователь является первым звеном системы измерения угла и значения дисбаланса.

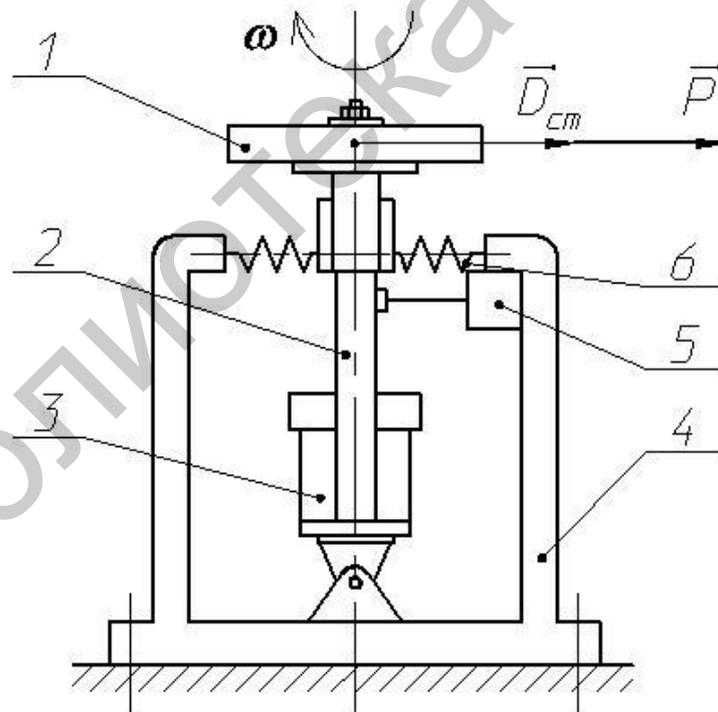


Рис. 1.6. Схема статической балансировки в поле сил инерции. Колебания происходят относительно фиксированной оси

### 1.1.2.3. Способы и средства выявления и определения динамической неуравновешенности роторов

Отклонение от параллельности оси вращения ротора его главной центральной оси инерции может быть выявлено при вращении сборочной единицы или детали на специальном балансировочном станке. Обычно действие на ротор главного момента и главного вектора заменяют действием эквивалентных систем (пар дисбалансов). При вращении неуравновешенных масс, находящихся от оси на расстоянии  $e$ , возникают центробежные силы, пропорциональные дисбалансам в плоскостях опор:  $F_a = m_a \cdot e_a \cdot \omega^2$ ;  $F_b = m_b \cdot e_b \cdot \omega^2$ .

Эти силы вызывают давление или вибрации в опорах ротора станка и через вибропреобразователи различных типов фиксируются соответствующей измерительной системой.

Данный способ выявления дисбалансов не является единственным, но практически для всех балансировочных станков используют именно его.

Балансировочные измерительные приборы, позволяющие получать информацию о дисбалансах ротора при балансировке на месте (в собственных подшипниках), действуют так же.

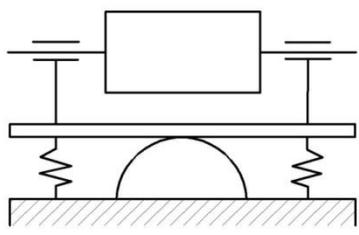
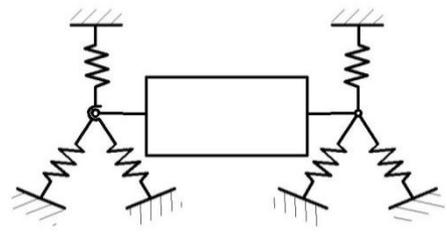
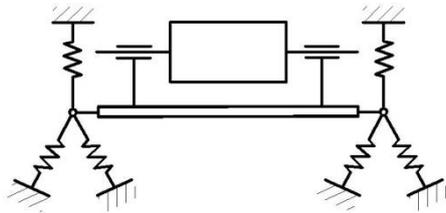
Относительно привода станка, выбираемого для выполнения операции, должны быть известны частота вращения при балансировке (об/мин) или диапазон бесступенчатого регулирования, номинальный при трогании и максимальный вращающие моменты на роторе (Н · м), тип привода ротора (торцовый привод от муфты или ленты, ременный привод, привод магнитным полем, роликом, струей воздуха и т. п.), мощность, тип, частоты вращения, напряжение, сила тока, частота и фазы переменного тока двигателя, способ торможения двигателя и детали и т. п.

Станки с двумя плоскостями измерения дисбаланса и более имеют специальные системы, исключая взаимное влияние этих плоскостей. Сигнал в измеряемой плоскости должен идти только от дисбаланса, находящегося в данной плоскости.

Механические системы станков, обеспечивающие необходимое число степеней свободы, приведены в табл. 1.1. Класс системы соответствует числу степеней свободы (I–VII), А – машины с колеблющейся рамой; Б – машины с независимыми опорами.

Механические системы станков

Класс	Конструктивная группа	
	А	Б
1	2	3
I		
II		
III		
IV		
V		

1	2	3
VI		
VII		

На рис. 1.7 представлена схема резонансного станка по системе II-A (см. табл. 1.1). Двигатель 8 сообщает вращение ротору 1 с закрепленным на нем фазовым диском 2. Стол 6 с ротором совершают под действием сил инерции и реакции пружины 5 колебания относительно оси 7, лежащей в плоскости коррекции  $aa$ .

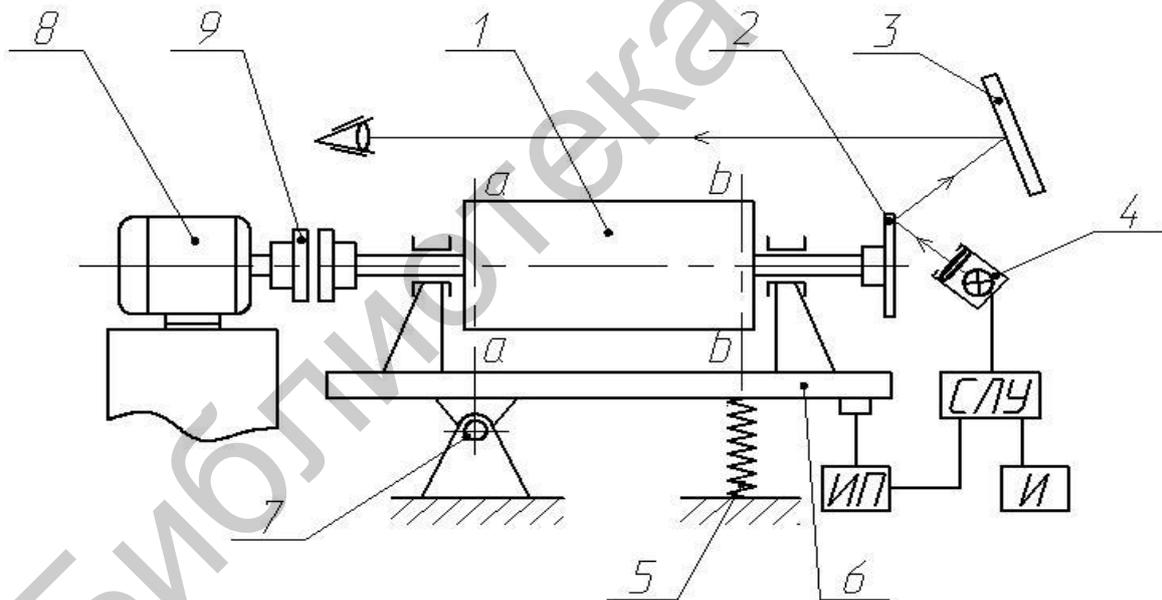


Рис. 1.7. Схема станда для динамической балансировки по системе II-A:  
 1 – балансируемый ротор; 2 – фазовый диск; 3 – экран; 4 – стробоскопическая лампа; 5 – пружина; 6 – стол; 7 – ось; 8 – электродвигатель; 9 – муфта;  
 И – индикатор; ИП – измерительный преобразователь;  
 СЛУ – счетно-логическое устройство;  $aa$  и  $bb$  – плоскости коррекции

Колебания воспринимаются измерительным преобразователем. В момент максимального отклонения системы счетно-логическое устройство зажигает стробоскопическую лампу 4, освещающую шкалу фазового диска, и передает

на индикатор сигнал, пропорциональный дисбалансу. Оператор видит на экране 3 фазу дисбаланса. После коррекции неуравновешенности в плоскости *bb* ротор поворачивают на 180° так, что последняя занимает место плоскости *aa*, и процесс повторяется.

#### **1.1.2.4. Способы устранения дисбалансов ротора**

Для уменьшения дисбалансов ротора используются так называемые корректирующие массы, которые могут удаляться из тела ротора, добавляться к нему, а также перемещаться по ротору. В машиностроении корректирующую массу удаляют по показаниям балансировочного оборудования различными технологическими методами: опиливанием, отламыванием приливов, точением, фрезерованием, шабрением, шлифованием, сверлением. В приборостроении используют электроискровую, электрохимическую, лазерную, электронно-лучевую и другие обработки с малым съемом материала в единицу времени.

Корректирующую массу в противофазу дисбаланса ротора добавляют приваркой, клепкой, пайкой, привертыванием специальных элементов определенной массы и на определенном радиусе. Материал корректирующей массы может наноситься также напылением, наплавлением и другими методами.

Если в процессе эксплуатации сборочных единиц наблюдается непрерывное режимное изменение дисбаланса под действием износа и переменных нагрузок, применяют управляемые балансирующие устройства (УБУ) и автоматические балансирующие устройства, позволяющие в заданный момент проводить корректировку масс. УБУ имеют специальные конструктивные элементы (втулки, секторы, сухари, шары, винты), перемещаемые в нужное место ротора.

#### **1.1.3. Конструкция накопителей на жестких магнитных дисках и балансировка их вращающихся элементов**

Накопитель на жестких магнитных дисках (НЖМД, *HDD*, от англ. *hard disk drive* – жесткий диск, винчестер) – энергонезависимое перезаписываемое компьютерное запоминающее устройство, информация в котором записывается на концентрические дорожки на вращающиеся жесткие алюминиевые или стеклянные пластины, покрытые слоем ферромагнитного материала. НЖМД – основной накопитель данных практически во всех современных компьютерах, часто применяемый также в портативных цифровых устройствах (фотоаппаратах, видеокамерах, аудиопроигрывателях) и в игровых приставках.

НЖМД состоит из следующих основных узлов (рис. 1.8): корпус, собственно жесткие диски (пластины), шпиндель с электроприводом, блок считывающе-записывающих головок с устройством позиционирования, блок электроники.

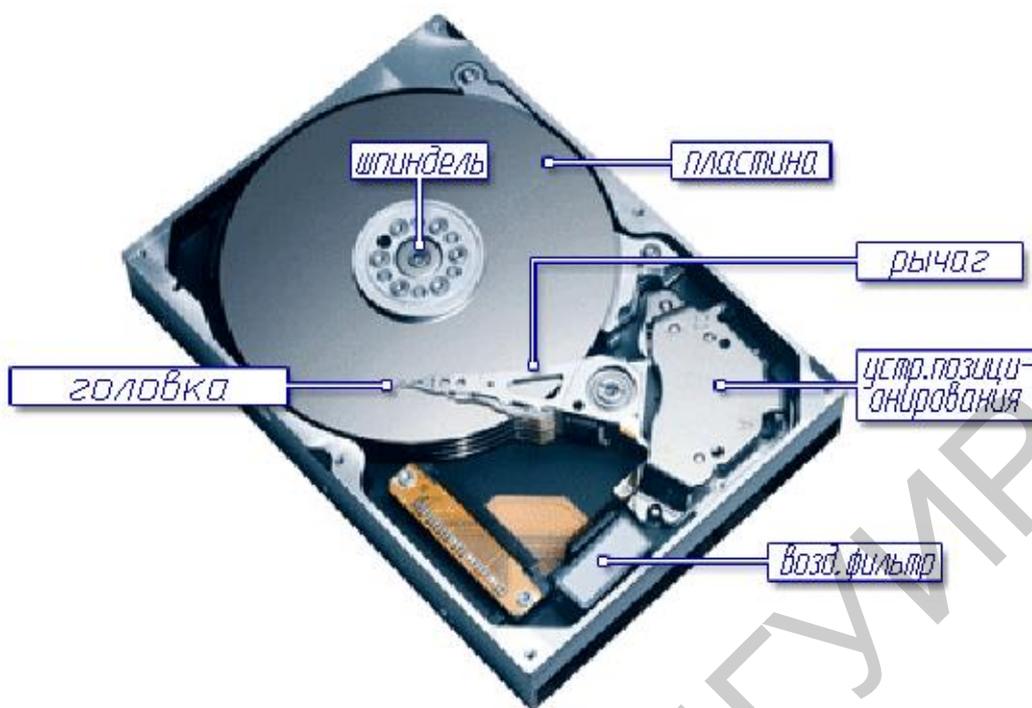


Рис. 1.8. Устройство НЖМД (крышка снята)

Ферромагнетики, которыми покрыты пластины современных НЖМД, – это сплавы на основе кобальта; ранее использовались оксиды железа и хрома. Диаметр пластин НЖМД для компьютеров при конструировании согласовывается с форм-фактором корпуса ПК: в большинстве настольных компьютеров используются накопители с пластинами диаметром 3,5 дюйма (89 мм) с шириной корпуса накопителя 102 мм, а в большинстве ноутбуков – 2,5 дюйма (64 мм) с шириной корпуса 70 мм. В малогабаритных портативных устройствах распространены размеры пластин 0,85, 1 и 1,8 дюйма.

Корпус накопителя негерметичен. Внутренняя полость сообщается с атмосферой через барометрический фильтр, способный задерживать частицы размером в несколько микрон. Это необходимо для поддержания постоянного давления внутри диска при колебаниях температуры корпуса. В камере накопителя также размещается фильтр рециркуляции, предназначенный для улавливания частиц, которые могут возникать внутри самого корпуса (например, при осыпании дисков вследствие механического воздействия головок при их «приземлении» и «взлете») или проникать через барометрический фильтр.

Серийно выпускаемые в настоящее время НЖМД имеют скорость вращения дисков 4200, 5400, 7200, 10 000 или 15 000 об/мин. Большинство производителей НЖМД применяют в приводах шпинделей жидкостные подшипники как более надежные, долговечные и менее склонные к вибрации по сравнению с шариковыми. Вариант устройства привода шпинделя приведен на рис. 1.9.

Конструкция из ротора 2 и опорной втулки 3 вращается на жидкостных подшипниках 7 на валу 4, неподвижно закрепленном в корпусе 1. Ротор в данном случае и является шпинделем, на который крепятся пластины (пластины и устройство их фиксации не показаны).

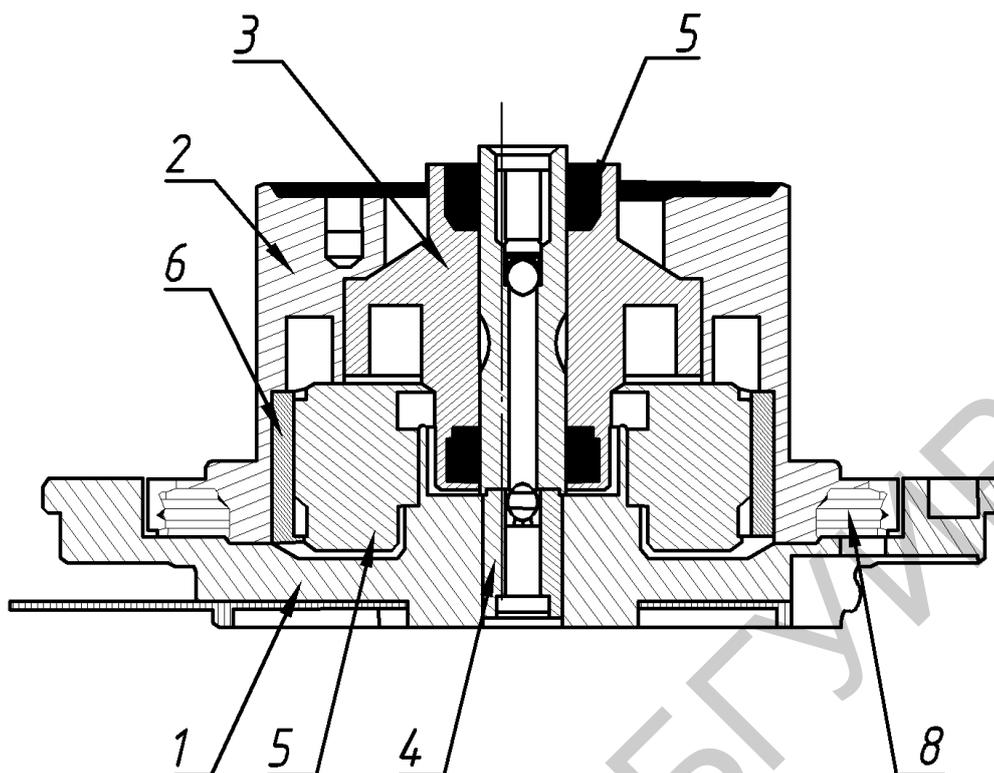


Рис. 1.9. Устройство привода пластин НЖМД:  
 1 – корпус накопителя; 2 – ротор; 3 – опорная втулка; 4 – вал;  
 5 – статор; 6 – роторная обмотка; 7 – подшипник;  
 8 – вырез для вставки балансировочных скоб

Для записи и считывания информации с поверхности пластин используются магнитные головки. При записи головка создает магнитное поле и намагничивает участок диска; при считывании намагниченный участок возбуждает сигнал в головке. Первоначально использовались индуктивные головки, недостаток которых состоял в сильной зависимости амплитуды сигнала от скорости перемещения магнитного покрытия и сильном влиянии шумов. На сегодняшний день используются магниторезистивные головки считывания, представляющие собой резисторы, сопротивление которых изменяется в зависимости от напряженности магнитного поля, причем амплитуда практически не зависит от скорости изменения поля. Использование магниторезистивных головок значительно повысило надежность считывания информации и плотность записи. Запись, однако, по-прежнему выполняется индуктивными головками. Головки, представляющие собой пару из записывающей и читающей и присоединяющиеся к гибким рычагам вместе с электропроводкой и предусилителями, образуют подвески. Подвески собираются в блоки («стопки», обслуживающие, соответственно, несколько пластин) (см. рис. 1.8).

Чтобы головки не касались поверхности пластины, им придают специальную аэродинамическую форму наподобие крыла самолета, принуждающую их приподниматься над поверхностью (на сегодня высота составляет 5–10 нм) под действием воздушных потоков, возникающих при вращении пластин. Во избе-

жание падения головки на пластину предусмотрена система «парковки» и соответствующая зона за пределами рабочей области.

Для позиционирования головок могут применяться шаговые и линейные двигатели механизмов позиционирования. В системах с шаговым двигателем головки перемещаются с определенным шагом, соответствующим расстоянию между дорожками. Дискретность шагов либо зависит от характеристик двигателя, либо задается сервисными метками на пластине.

В системах с линейным приводом головки приводятся в движение электромагнитом, размещенным в хвостовике посаженного на ось позиционера (см. рис. 1.8). Позиционер – это блок головок (*HSA*) с относительно массивным хвостовиком. Обмотку хвостовика окружает статор, представляющий собой постоянный магнит. Изменяя ток в обмотке, можно устанавливать позиционер в любое положение. При его поворотах головки совершают движение по дуге между центром и периферией пластины.

Электронный блок накопителя включает микропроцессор, ПЗУ с программой, рабочее ОЗУ, цифровой обработчик сигналов (для подготовки записываемых и обработки считываемых сигналов) и интерфейсную логику. Программа процессора состоит из модулей и может быть полностью записана в отдельную микросхему ПЗУ или в масочное ПЗУ процессора; определенная часть кода может быть записана в служебной области диска. Параметры накопителя (модель, серийный номер, таблица сбойных секторов и т. п.) хранятся также в виде модулей на дисках, в служебной области или в электрически перепрограммируемом ПЗУ.

Многие НЖМД имеют на плате электроники специальный технологический интерфейс с разъемом, через который при помощи стендового оборудования можно выполнять различные сервисные операции – тестирование, форматирование, переназначение дефектных участков и т. п.

Требования к точности балансировки жестких дисков соответствуют первому классу по ГОСТ 22061–76:  $0,16 \text{ мм} \cdot \text{рад/с} \leq \Pi \leq 0,40 \text{ мм} \cdot \text{рад/с}$ . Обычно проводится балансировка пластин в сборе с электроприводом в собственных опорах. Наиболее распространены следующие способы устранения дисбалансов узла «пластины – привод»:

1) размещение проволочных балансировочных скоб в окружностях специальных вырезов в нижней (см. рис. 1.9) и/или верхней части ротора привода пластин; положение скоб варьируется для уравнивания узла;

2) установка грузов определенной массы в гнезда присоединенного к ротору специального устройства-держателя; точность метода ограничена дискретностью массы грузов;

3) уравнивание с помощью устройства, присоединенного к ротору, содержащего корректирующие массы с возможностью перемещения в радиальном направлении, управляемые механически или электромагнитным полем (это и есть так называемые УБУ);

4) установка пластин на шпиндель таким образом, чтобы дисбалансы в их плоскостях компенсировали друг друга;

5) снятие неуравновешенной массы с краев пластин прецизионными методами обработки, например испарением лучом лазера (рис. 1.10), т. е. пластины являются плоскостями коррекции.

Способы устранения дисбалансов путем добавления корректирующих масс более дорогостоящи, т. к. предполагают разработку и изготовление грузов, устройств-держателей, сложных УБУ. Кроме того, любые дополнительные элементы снижают надежность конструкции, повышают вероятность образования мелких твердых частиц, способных нарушить работу накопителя, внутри корпуса. Способы, состоящие в установке балансировочных скоб и грузов, значительно удорожают процесс сборки НЖМД, т. к. затрудняют автоматизацию, а первый, вдобавок, предполагает дополнительные переходы разборки и сборки. Достоинством же этой группы способов является обратимость коррекции массы и простота организации балансировки при техническом обслуживании готовых НЖМД.

Метод установки пластин с компенсацией дисбалансов сильно ограничен в точности и неприменим для накопителей с одной пластиной.

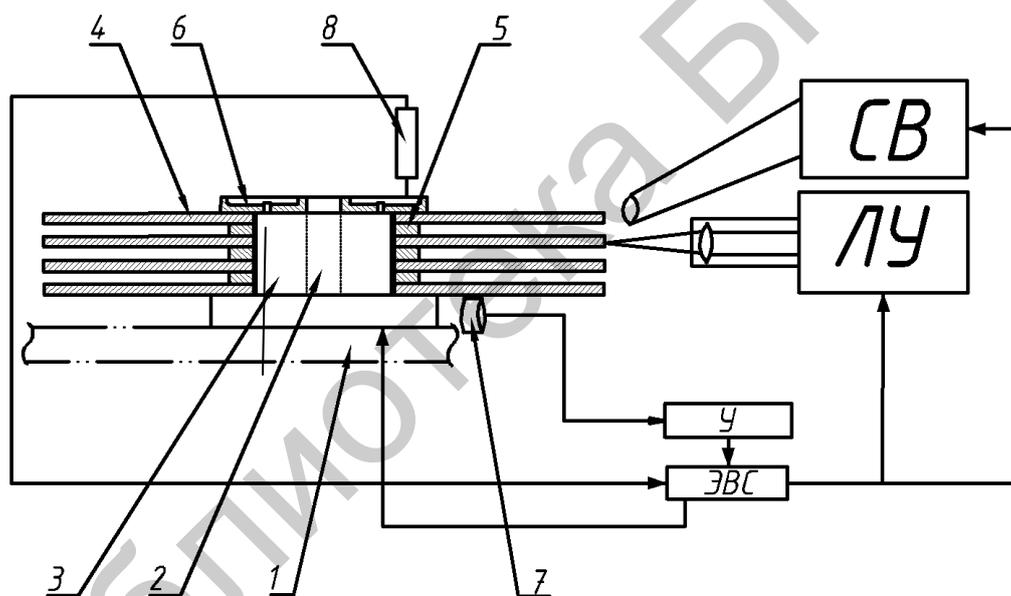


Рис. 1.10. Схема установки лазерной балансировки НЖМД:  
 1 – корпус НЖМД; 2 – вал; 3 – ротор-шпиндель; 4 – пластина;  
 5 – распорное кольцо; 6 – зажимная крышка; 7 – измерительный преобразователь; 8 – фазовый отметчик; У – усилитель сигнала;  
 ЭВС – вычислительное средство; ЛУ – устройство лазерного удаления материала; СВ – система вытяжки

Способы, предполагающие снятие массы с краев пластин, намного более точны, менее трудоемки, не усложняют конструкцию и не повышают вероятность образования частиц внутри накопителя. Тем не менее снятие массы является необратимым и предполагает наличие специально отведенных для этого областей на краях пластин.

## 1.2. Оборудование и материалы

1. Прибор вибродиагностики и балансировки «Агат-М».
2. Датчик вибрации АС102-1А (2 шт.) со щупом.
3. Лазерный отметчик КР-020Л с магнитной стойкой и метками.
4. Комплект кабелей.
5. НЖМД *Seagate ST3160023A*.
6. Клейкая лента с известной поверхностной плотностью.
7. Ножницы.
8. Штангенциркуль.

## 1.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить теоретическую часть, описания и порядок работы с прибором «Агат-М» и другим оборудованием.

2. Исходя из требований к точности балансировки НЖМД, зная массу вращающегося узла предложенного накопителя и рабочую частоту его вращения, рассчитать по формуле (1.2) верхнее значение главного вектора допустимых дисбалансов. Значение главного вектора эксплуатационных дисбалансов принять равным нулю.

3. Исходя из конструкции накопителя и положения центра масс его вращающегося узла, построить схему размещения плоскостей измерения дисбалансов по одному из вариантов рис. 1.3 с указанием значений всех величин.

4. По формулам (1.7) и (1.8) рассчитать верхние значения допустимых дисбалансов в каждой из двух плоскостей измерения.

5. Запустить НЖМД и измерить с помощью прибора «Агат-М» фактические амплитуды и фазы дисбалансов в выбранных плоскостях измерения, сделать вывод о необходимости балансировки.

6. По формуле (1.7) или (1.8) пересчитать одно из измеренных значений в фактическое значение главного вектора дисбалансов.

7. Выбрать пластины накопителя, которые будут использованы как плоскости коррекции, и построить схему размещения плоскостей коррекции дисбалансов по одному из вариантов рис. 1.3 с указанием значений всех величин.

8. Подставив в формулы (1.7) и (1.8) фактическое значение главного вектора дисбалансов, вычислить фактические значения дисбалансов в выбранных плоскостях коррекции.

9. Исходя из определения дисбаланса и полученных в пп. 5 и 6 значений фаз, подобрать необходимые значения корректирующих масс и места их расположения на пластинах, выбранных в качестве плоскостей коррекции.

10. Из клейкой ленты вырезать радиально симметричные фрагменты, соответствующие корректирующим массам, и наклеить их в выбранные места.

11. Повторить измерения, выполненные в пп. 3 и 8. Сравнить измеренные значения и сделать вывод о результатах балансировки.

## 1.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схемы расположения плоскостей измерения и коррекции.
3. Расчет верхних значений векторов допустимых дисбалансов (главного и в плоскостях измерения).
4. Результаты измерения дисбалансов, расчет фактических дисбалансов в плоскостях коррекции.
5. Значения и схемы размещения корректирующих масс.
6. Результаты измерения дисбалансов после размещения корректирующих масс.
7. Выводы.

## 1.5. Контрольные вопросы

1. В чем заключается неуравновешенность ротора? Что такое дисбаланс?
2. Назовите виды неуравновешенности и их сущность.
3. Каковы этапы балансировки?
4. Как нормируется точность балансировки?
5. Какое оборудование применяется при статической балансировке?
6. Опишите принцип действия оборудования системы II-A для динамической балансировки.
7. К каким нежелательным явлениям может привести неуравновешенность вращающихся узлов НЖМД?
8. Назовите способы устранения дисбалансов вращающихся узлов НЖМД.

## Список использованных источников

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 2005. – 496 с.
2. ГОСТ 19534–74. Балансировка вращающихся тел. Термины. – Введ. 1974–25–02. – М. : Государственный комитет стандартов СМ СССР.
3. ГОСТ ИСО 1940–1–2007. Вибрация. Требования к качеству балансировки жестких роторов. Часть 1. Определение допустимого дисбаланса. Принят 24.10.2007 Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации.
4. Щепетильников, В. А. Балансировка машин и приборов / В. А. Щепетильников. – М. : Машиностроение, 1979. – 271 с.
5. Левит, М. Е. Балансировка деталей и узлов / М. Е. Левит, В. М. Рыженков. – М. : Машиностроение, 1986. – 248 с.
6. Петрухин, В. В. Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации / В. В. Петрухин, С. В. Петрухин. – М. : Инфра-Инженерия, 2010. – 176 с.
7. Гусаров, А. А. Балансировка роторов машин / А. А. Гусаров. – М. : Наука, 2005. – 384 с.

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СЕЛЕКТИВНОЙ СБОРКИ ОПТИЧЕСКОГО УЗЛА

**Цель работы:** ознакомиться с основными геометрическими параметрами оптических деталей, методами и средствами их измерения; овладеть навыками измерений толщины, радиуса кривизны и других параметров линз, пластин и призм; ознакомиться с методами измерения шероховатости и цилиндричности оптических деталей; изучить метод групповой взаимозаменяемости путем выполнения необходимых размерных расчетов, рассортировки деталей на группы и сборки их в сборочные единицы.

#### 2.1. Краткие теоретические сведения

##### 2.1.1. Измерение толщины линз и пластин

Оптические системы включают как отдельные оптические детали, так и узлы с различным сочетанием линз, пластин, призм, зеркал и др. Состав конструктивных элементов и их вид определяется в первую очередь назначением узла. Например, пластины могут быть защитными и выравнивающими, плоскопараллельными и клиновыми (с заданным углом между поверхностями), фильтрующими (из цветного стекла или со специальными покрытиями). Зеркальные покрытия могут полностью отражать падающий свет (глухие) или разделять его на проходящий и отраженный (полупрозрачные зеркала).

Общими для оптических деталей параметрами являются толщина по оси и по краю, радиус поверхностей, предел разрешения для плоских деталей и др.

Измерение **толщины пластин и линз по центру ( $t$ )** и **косины по краю ( $\Delta t$ )**, являющееся одним из способов определения децентричности линз и клиновидности пластин, проводят на специальных измерительных приборах, в частности толщиномерах. Обычно такой прибор имеет нижнюю опорную поверхность для установки измеряемых линз и стойку, на которой перемещается индикатор. При измерении  $t$  линза устанавливается центром на шариковый упор,  $\Delta t$  – на кольцевую оправу, по краю – на призматический упор. Положение измерительной головки индикатора при измерении  $t$  соосно упору, при измерении  $\Delta t$  – с отступлением от края линзы на 5–10 мм.

Простейший толщиномер на базе микрометра с диапазоном измерений до 25 мм (рис. 2.1) предназначен только для определения толщины линз по центру и пластин в любом сечении. Мерительные стержни 1 и 2 толщиномера приводятся в соприкосновение и по нониусу 3 делается отсчет (обычно при соприкосновении стержней индекс нониуса стоит на нуле). Затем между стержнями вводится измеряемая деталь и производится второй отсчет. Разность отсчетов соответствует толщине. Обычно делается несколько замеров, а для определения клина пластинки измеряют ее толщину в различных местах.

Толщиномер, изображенный на рис. 2.1, служит для контроля деталей в цеховых условиях, его точность составляет  $\pm 0,03$  мм для  $L = 25$  мм.

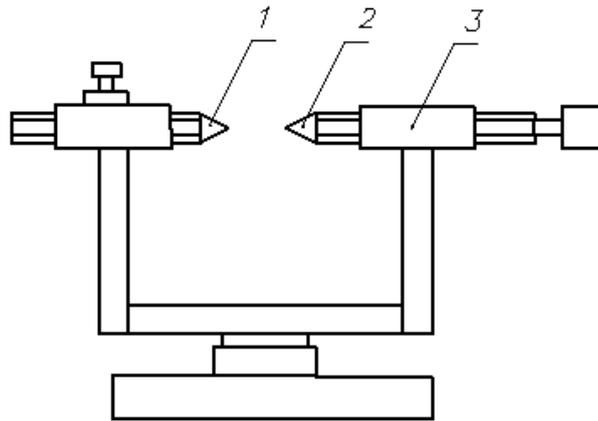


Рис. 2.1. Толщиномер на базе микрометра:

1 – неподвижный стержень; 2 – подвижный стержень; 3 – отсчетное устройство

Точность длинномеров, отсчет в которых проводится специальным механизмом с ценой деления 0,001 мм, оценивается не хуже  $\pm 0,01$  мм.

На толщиномерах и длинномерах можно точно измерить и диаметр (сторону) детали, но в производстве для этого используются специальные проходные и непроходные скобы.

Для линз определяющим является **радиус кривизны**, причем соблюдение заданной точности поверхности контролируется в течение всего технологического процесса их изготовления. Так, отклонения от номинала сферических поверхностей могут измеряться:

1. *Методом шаблона*, который применяется для определения отклонений формы шлифовальных сферических поверхностей. Шаблон (рис. 2.2) представляет собой металлическую пластину с выпуклой или вогнутой измерительной кромкой заданного радиуса. Сферы измеряют наложением мерительной кромки шаблона А на измеряемую поверхность детали Б (рис. 2.3). По величине зазора  $\Delta H$  оценивают отклонение радиуса кривизны детали.

2. *Прямым измерением толщины детали*. Метод основан на том, что поверхность любой сферической детали представляет собой шаровой сегмент. Основными элементами этого сегмента  $AECD$  является  $D$ , радиус сферы  $R$ , высота, или стрелка  $H$  (рис. 2.4). Геометрическая связь между этими величинами определяется по формуле

$$H = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{D}{2}\right)^2}, \quad (2.1)$$

откуда радиус сферы равен

$$R = \frac{D^3}{8H} + \frac{H}{2}. \quad (2.2)$$

Зная диаметр сферической поверхности и измерив стрелку прогиба  $H$ , можно определить радиус сферической поверхности с точностью до 0,01 мм.

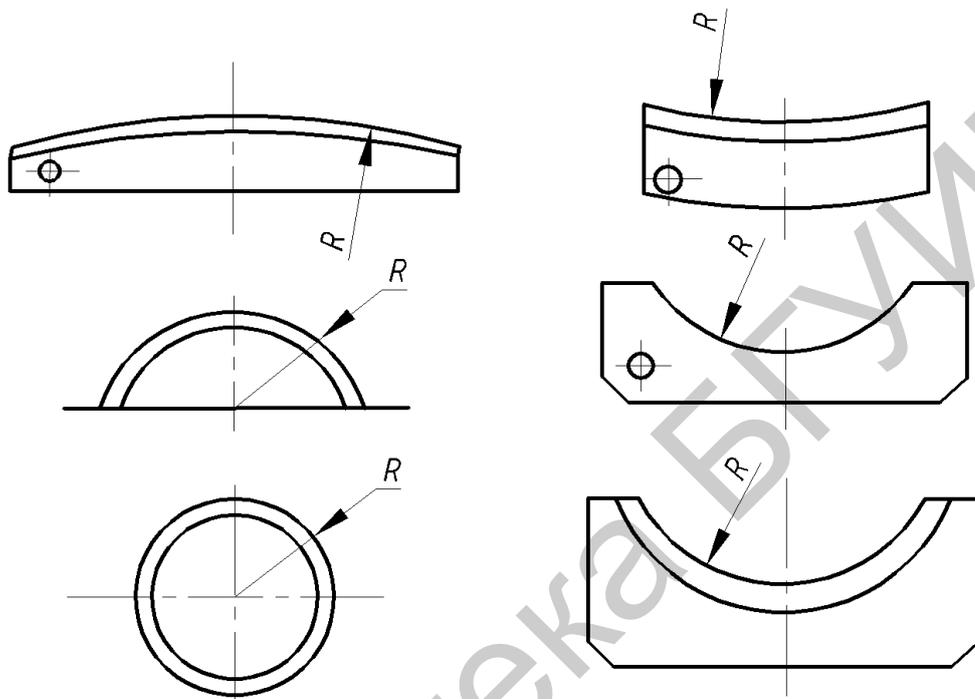


Рис. 2.2. Виды шаблонов

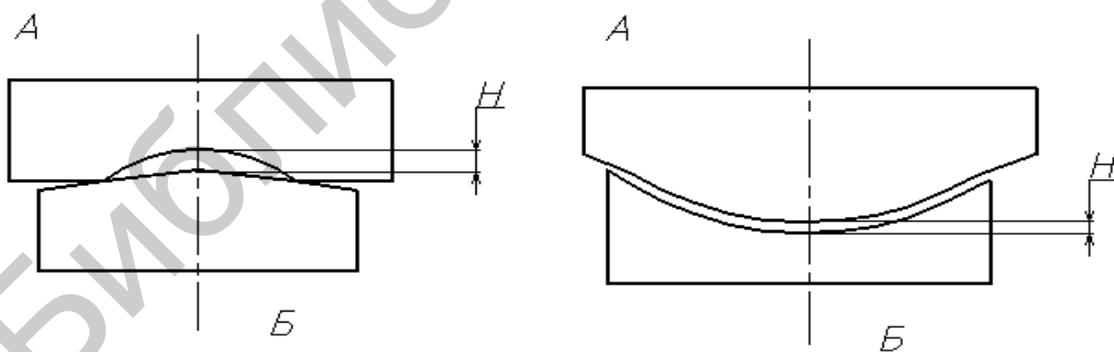


Рис. 2.3. Схема определения сферичности методом фотошаблона

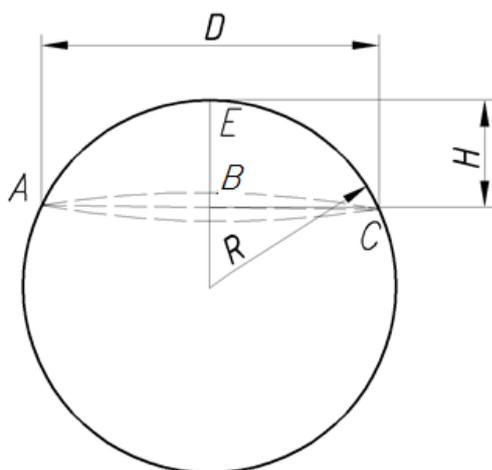


Рис. 2.4. Параметры шарового сегмента

3. *Косвенно*, по измерению радиуса кривизны детали на кольцевом сферометре. Сферометр ИЗС-7 (рис. 2.5) предназначен для измерения радиусов кривизны пар основных пробных стекол (ГОСТ 2786–82), а также радиусов отдельных выпуклых и вогнутых сферических поверхностей.

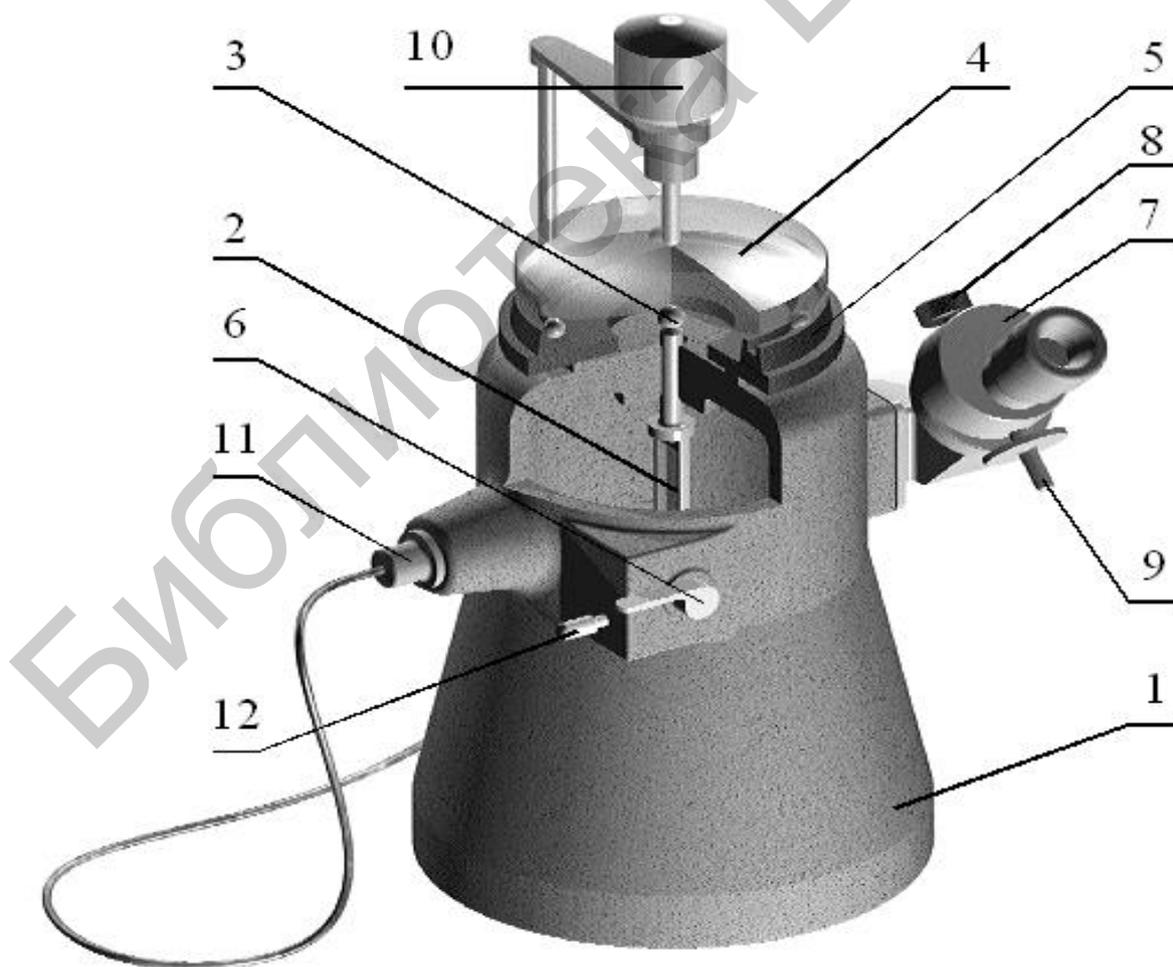


Рис. 2.5. Устройство кольцевого сферометра ИЗС-7

Внутри литого металлического корпуса прибора 1 (см. рис. 2.5) находится измерительный стержень 2 со стеклянной миллиметровой шкалой длиной 30 мм. Под действием противовеса стержень поднимается вверх и своим сферическим наконечником 3 соприкасается с поверхностью контролируемой детали 4. Для опускания измерительного стержня вниз служит арретир 6. Отсчет по шкале производится при помощи микроскопа со спиральным окуляром-микрометром 7 с ценой деления 0,001 мм. Шкала освещается лампочкой, помещенной в патрон 11 и включаемой в сеть через трансформатор. Сферометр снабжается набором из семи сменных колец 5 с диаметрами 15, 21, 30, 42, 60, 85 и 120 мм. В случае если вес измеряемого изделия недостаточен для преодоления измерительного усилия, применяют упор 10, который прижимает оптическую деталь к опорному кольцу сферометра. Детали прибора 8, 9, 12 используют для юстировки.

Основные характеристики сферометра приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Основные технические характеристики сферометра ИЗС-7

Характеристика	Значение
Пределы измерения радиусов пар пробных стекол	37,5–750 мм
Предельная погрешность результата измерения радиусов пар пробных стекол	±0,02 %
Пределы измерения радиусов отдельных сферических поверхностей	10–1000 мм
Предельная погрешность результата измерения радиусов отдельных сферических поверхностей:	
от 10 до 37,5 мм	±0,07 %
от 37,5 до 1000 мм	±0,04 %
Увеличение микроскопа	62 <sup>x</sup>
Длина миллиметровой шкалы	30 мм
Цена деления:	
спирального окулярного микрометра	0,001 мм
миллиметровой шкалы	1 мм

Принцип действия сферометра основан на измерении стрелки прогиба  $h$  поверхности по известному диаметру  $2r$  опорного кольца сферометра (рис. 2.6). Для этого на кольцо устанавливают сначала плоскую эталонную поверхность 1, а затем измеряемую 2. В момент касания измерительного стержня 3 с поверхностью берут отсчеты  $m_0$  и  $m$  по шкале измерительного стержня и определяют стрелку прогиба по формуле

$$h = m - m_0.$$

Функциональная зависимость  $R$ ,  $h$  и  $r$  имеет вид

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} . \quad (2.3)$$

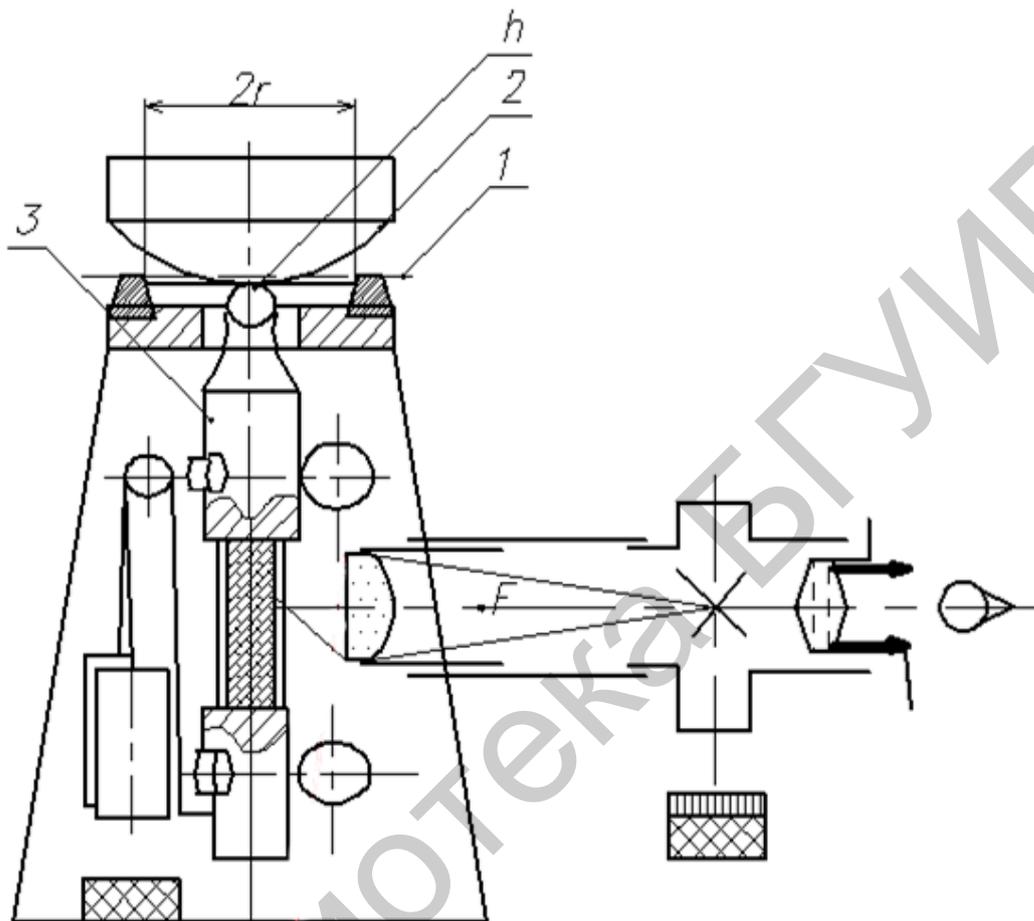


Рис. 2.6. Схема определения сферичности с помощью сферометра:  
1 – плоская эталонная поверхность; 2 – измеряемая поверхность;  
3 – измерительный стержень

### 2.1.2. Измерение шероховатости и цилиндричности оптических деталей

Различают промежуточный и окончательный контроль чистоты поверхностей оптических деталей. *Промежуточный контроль* осуществляется в процессе изготовления детали и заключается в осмотре обработанной поверхности с целью обнаружения на ней повреждений, которые не могут быть удалены последующей обработкой (следы предыдущей обработки, царапины, заколы).

*Окончательный контроль* осуществляется в соответствии с ГОСТ 11141–84 только для полированных поверхностей, например, шероховатости  $R_z$  которых

состоят не более 0,1 мкм. Регламентируются поперечные и продольные размеры дефектов, их суммарная длина и число, скопления дефектов. Так, класс 0–10 допускает на полированной поверхности наличие царапин, ширина которых не превышает 0,002 мм, и точек диаметром не более 0,004 мм. Размер световой зоны с такими требованиями обычно составляет 1/3 полного светового диаметра поверхности.

Контроль оптических поверхностей классов чистоты 0–10, 0–20 и 0–40 производят визуально при помощи оптического прибора, увеличение которого соответствует тому, при котором деталь рассматривается в приборе, но не менее  $6^{\times}$ . Если такое указание отсутствует, то контроль производят при помощи  $25^{\times}$  микроскопа (например, МИР-2) для класса 0–10,  $10\text{--}12^{\times}$  лупы для класса 0–20 и  $6^{\times}$  лупы для класса 0–40. Поверхности более грубых классов контролируются невооруженным глазом. Поскольку степень видимости царапин зависит от направления падающего света (вдоль или поперек царапины), то деталь во время контроля вращают. Поверхность рассматривается на фоне черного экрана (обычно черный бархат) при освещении лампой накаливания мощностью от 50 до 100 Вт. Колба лампы должна быть прозрачной. Оптимальный угол падения лучей  $45^{\circ}$ . Размеры царапин и точек оценивают визуально сравнением с наборами образцов царапин и точек.

Измерение образцовых царапин и точек производится на микроскопе типа УИМ в косо направленных пучках света на темном фоне. В сомнительных случаях размеры царапин и точек проверяют с помощью микроскопа с окуляром-микрометром, освещая поверхность конденсором темного поля. В положении 3 (см. ГОСТ 11141–84) приведен конкретный числовой пример расчета по скоплению дефектов.

Особый вид линз – цилиндрические. Они имеют дополнительное специфическое требование: **непараллельность** образующих в плане (разворот образующих). Обычно разворот составляет от 1 мин до нескольких градусов.

Измеряется разворот образующих с помощью гониометра ГС-5 (рис. 2.7). Коллиматор 2, столик 3 и алидада 5 со зрительной трубой 1 крепятся на массивном основании. На столике размещаются исследуемые объекты. Коллиматор закреплен неподвижно, а столик и алидада с трубой могут вращаться вокруг вертикальной оси.

Ширину коллиматорной щели можно менять от 0 до 2 мм при помощи микрометрического винта 13, высоту – от 0 до 2 см – при помощи диафрагмы с треугольным вырезом («ласточкин хвост»), надетой на щель. Винт 4 служит для перемещения объектива зрительной трубы – настройки коллиматора на параллельный пучок. Зрительная труба 1 состоит из объектива и окуляра с автоколлимационным устройством 12. Объективы коллиматора и зрительной трубы одинаковы. Фокусировка трубы производится винтом 11. Наклон коллиматора и зрительной трубы к горизонтальной оси измеряется винтами 6 и 7 соответственно.

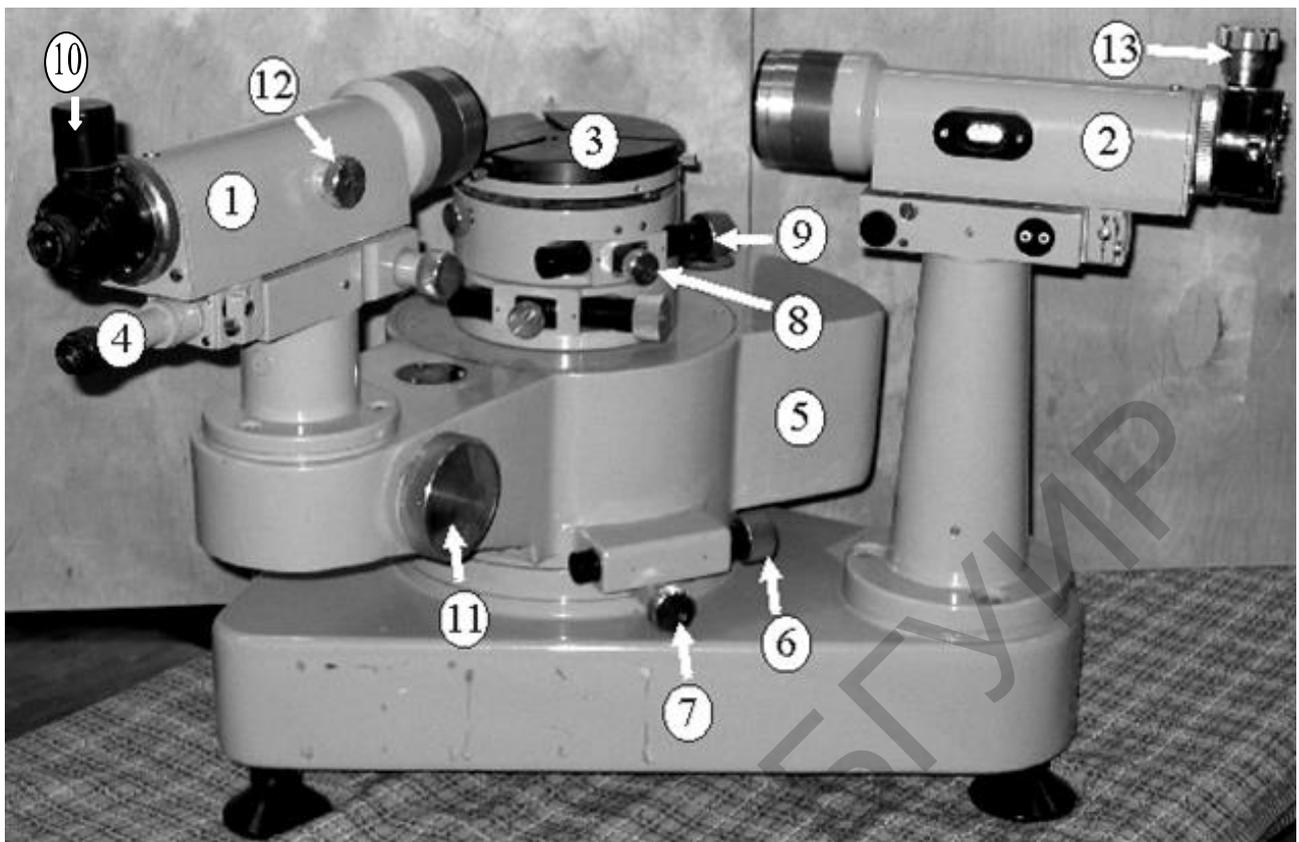


Рис. 2.7. Внешний вид гониометра ГС-5

**Методика измерения разворота образующих с помощью гониометра.**

Установить в автоколлимационную трубу окуляр Аббе, включить освещение. При помощи плоскопараллельной пластины тщательно выставить визирную ось зрительной трубы перпендикулярно оси вращения алидады. Затем развернуть столик так, чтобы один из регулировочных винтов 3 столика был обращен к зрительной автоколлимационной трубе. Поставить на центр столика контролируемую цилиндрическую линзу 2 (рис. 2.8) и, наклоняя столик винтом 9, привести горизонтальный щелевидный блик, отраженный от первой цилиндрической поверхности, к перекрестию окуляра. Выставить образующую первой цилиндрической поверхности параллельно оси вращения алидады с помощью винта наклона столика 1 так, чтобы при повороте зрительной трубы в положения *A* и *B* наблюдаемое щелевидное изображение от первой поверхности не смещалось по вертикали более чем на 0,1–0,05 деления. При необходимости винтом 10 наводится резкость изображения щели объектива. В поле зрения одновременно наблюдаются два изображения – от первой (I) и второй (II) поверхностей. Различают их, увлажнив (дыханием) вторую поверхность Б, при этом блик от нее исчезает. Затем следует развернуть зрительную трубу на 180° в положение Б'.

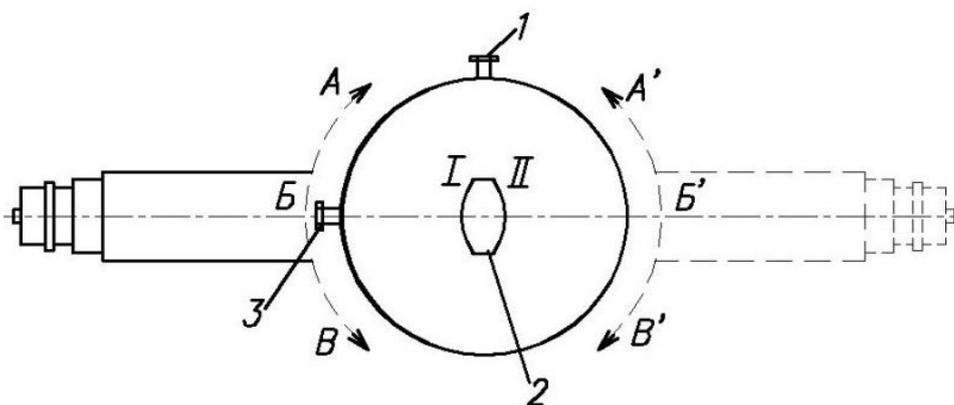


Рис. 2.8. Контроль цилиндрической линзы на гониометре:  
 1 – винт наклона столика; 2 – контролируемая линза; 3 – регулировочный винт столика

Разворот образующих определяется по смещению изображения от второй поверхности, отсчитываемому по вертикальной шкале окуляра при дополнительном повороте трубы на угол  $\varphi$  ( $5^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$ ) из положения А в положение В', и подсчитывается по формуле

$$\beta = \frac{h}{L} = \frac{mg360^\circ}{2\pi\varphi^\circ}, \quad (2.4)$$

где  $\beta$  – разворот образующих;

$m$  – число делений сетки, на которое сместилось изображение (в том числе и доля деления);

$g$  – угловая цена деления сетки окуляра при автоколлимации ( $g = 30$ );

$\varphi$  – угол поворота зрительной трубы, соответствующий смещению изображения на  $m$  делений.

Вид в поле зрения окуляра показан на рис. 2.9. Для точного определения долей деления сетки окуляра можно использовать барабанчик регулировочного винта наклона зрительной трубы: одно деление его шкалы соответствует 0,03 деления сетки окуляра. Погрешность измерения составляет около 10 %.

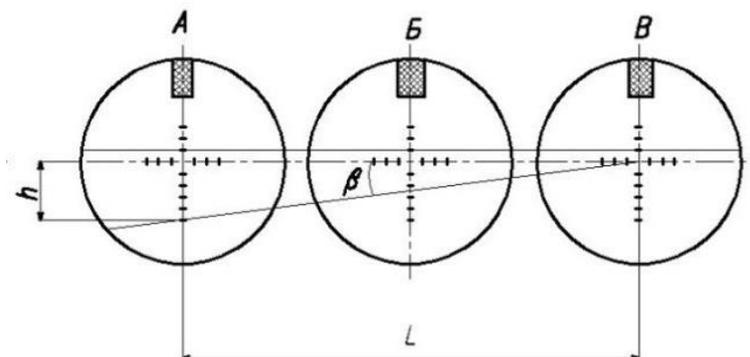


Рис. 2.9. Вид в поле зрения окуляра

Величина «клина» цилиндрической линзы по аналогии с измерением клиновидности плоскопараллельных пластин определяется по расстоянию между одновременно наблюдаемыми щелевидными изображениями от первой и второй поверхностей цилиндрической линзы по формуле

$$\gamma = k'qn , \quad (2.5)$$

где  $k'$  – число делений сетки окуляра, соответствующее расстоянию между изображениями;

$n$  – коэффициент преломления стекла измеряемой линзы.

Данная методика пригодна для измерения линз, радиус кривизны цилиндрической поверхности которых лежит в пределах от 50 до 600 мм.

### 2.1.3. Характеристика сборочных процессов

Процесс сборки является заключительным этапом изготовления приборов, в значительной степени определяющим их основные эксплуатационные качества. Условия достижения высоких эксплуатационных качеств не ограничиваются созданием удачной конструкции или применением высококачественных материалов. Не гарантирует этих качеств и высокоточное изготовление деталей с обеспечением оптимального состояния поверхностных слоев, их сопряженных или рабочих поверхностей. Процесс изготовления прибора может гарантировать достижение всех требуемых эксплуатационных показателей, а также его надежности и долговечности в эксплуатации лишь при условии высококачественного проведения всех этапов сборки приборов (т. е. сборки и регулировки отдельных сборочных единиц, узлов и общей сборки и испытаний изготовленного изделия в целом). Это связано с тем, что в процессе сборки вполне доброкачественных деталей по различным причинам могут возникать погрешности взаимного расположения, существенно снижающие точность и служебные качества собираемого изделия.

Причинами возникновения таких погрешностей могут быть:

– ошибки, допускаемые рабочим при ориентации и фиксации положения собираемых деталей (образование зазоров между торцами втулок, монтируемых на валах, и торцами соответствующих фланцев и буртиков валов в связи с недостаточно плотным их соединением или сдвигом втулки сверлом при за сверливании штифтового отверстия «по месту»);

– попадание грязи и стружки между сопрягаемыми поверхностями;

– нарушение правильной последовательности затяжки винтовых соединений и непостоянство усилия затяжки и т. д.;

– погрешности установки калибров и измерительных средств, применяемых при сборке;

- погрешности регулирования, пригонки и контроля точности детали в изделии, достигнутые при сборке, а также погрешности измерительных средств;
- относительные сдвиги деталей в промежутке времени между их установкой в требуемое положение и их фиксацией в этом положении;
- образование задиров на сопрягаемых поверхностях деталей;
- упругие деформации сопрягаемых деталей и пластические деформации поверхностей сопряжения, нарушающие их точность и плотность соединений.

Виды методов достижения точности замыкающего звена размерной цепи при сборке, их сущность и области применения приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Методы достижения точности замыкающего звена размерной цепи при сборке

Метод	Сущность метода	Область применения
1	2	3
Полной взаимозаменяемости	Точность достигается у всех объектов путем включения в размерную цепь составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значения	В условиях достижения высокой точности при малом числе звеньев размерной цепи и при достаточно большом числе изделий, подлежащих сборке
Неполной взаимозаменяемости	Точность достигается у заранее обусловленной части объектов путем включения в нее составляющих звеньев без выбора, подбора или изменения их значения	Рекомендуется для многозвенных размерных цепей. Допуски на составляющие звенья при этом больше, чем в предыдущем методе, что повышает экономичность получения сборочных единиц. У части изделий погрешность замыкающего звена может быть за пределом допуска на сборку, т. е. возможен риск несобираемости
Групповой взаимозаменяемости	Точность достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих к одной из групп, на которые они предварительно рассортированы	Для достижения наиболее высокой точности замыкающих звеньев мало-звенных размерных цепей. Требует четкой организации сортировки деталей на размерные группы, их маркировки, хранения и транспортирования в специальной таре

1	2	3
Пригонки	Точность достигается изменением размера компенсирующего звена путем удаления с компенсатора определенного слоя материала	При сборке изделий с большим числом звеньев. Детали могут изготавливаться с экономичными допусками, но требуются дополнительные затраты на пригонку компенсатора. Экономичность зависит от выбора компенсирующего звена, которое не должно принадлежать нескольким связанным размерным цепям
Регулирования	Точность достигается изменением размера или положения компенсирующего звена без удаления материала с компенсатора	Аналогичен методу пригонки, но имеет большее преимущество, т. к. при сборке не требуется снятие слоя материала; обеспечивает высокую точность и дает возможность периодически ее восстанавливать при эксплуатации изделий

#### 2.1.4. Метод групповой взаимозаменяемости (селективная сборка)

При достижении точности по методу групповой взаимозаменяемости требуемая точность замыкающего звена достигается путем включения в размерную цепь составляющих звеньев, принадлежащих к общей группе предварительно измеренных и рассортированных деталей.

Детали изделия обрабатываются по расширенным, а также экономически достижимым производственным допускам и сортируются по их истинным размерам на группы так, чтобы при соединении деталей, входящих в определенные группы, было обеспечено достижение установленного допуска замыкающего звена и гарантирована требуемая точность сборочного соединения. Метод применяется главным образом для размерных цепей, состоящих из небольшого числа звеньев, для сборочных соединений особо высокой точности, практически недостижимой методом полной взаимозаменяемости. Расчет групповых допусков сводится к определению числа групп  $n$ , на которые должны быть рассортированы сопрягаемые детали, величины групповых допусков и предельных отклонений групповых размеров. Допуск замыкающего звена соединения, изображенного на рис. 2.10, при поставленных в чертеже широких, экономически достижимых допусках составляющих звеньев  $(IT)A_1$  и  $(IT)A_2$  определяется выражением

$$(IT)\Delta = \Delta_{\max} - \Delta_{\min} = (IT)A_1 + (IT)A_2, \quad (2.6)$$

где  $\Delta_{\max}$  и  $\Delta_{\min}$  – наибольший и наименьший зазоры соединения.

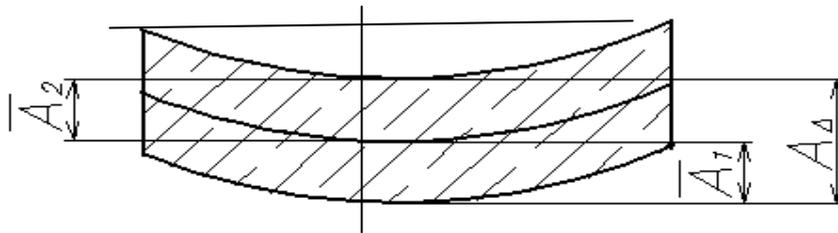


Рис. 2.10. Расчет размерной цепи в соединении

Для повышения точности без ужесточения экономически достижимых допусков на составляющие звенья  $(IT)A_1$  и  $(IT)A_2$  поля этих допусков делятся на  $n$  частей (групп), образуя групповые допуски  $(IT)A_1^{gp}$  и  $(IT)A_2^{gp}$  (рис. 2.11, а). Соответственно все детали, изготовленные по допускам  $(IT)A_1$  и  $(IT)A_2$ , сортируются по группам в пределах групповых допусков и поступают на сборку групповыми комплектами (комплект первой группы, комплект второй группы и т. д.). При этом соединение деталей общей группы производится без всякого дополнительного подбора, т. е. по принципу полной взаимозаменяемости. Если по условиям эксплуатации изделия наибольший зазор соединения  $\Delta_{max}$  должен быть уменьшен до величины  $\Delta_{max}^{gp}$ , то необходимая величина группового допуска  $(IT)A_2^{gp}$  может быть определена из выражения

$$(IT)A_2^{gp} = \Delta_{max}^{gp} - \Delta_{min} - (IT)A_1, \quad (2.7)$$

где  $\Delta_{min}$  – наименьший зазор соединения, определяемый эксплуатационными требованиями, указанный в чертеже изделия.

Количество необходимых групп  $n$  определяется по формуле

$$n = (IT)A_2 / (IT)A_2^{gp}. \quad (2.8)$$

Для обеспечения равномерности соединений в разных группах (постоянство предельных зазоров во всех группах) необходимо, чтобы  $(IT)A_1 = (IT)A_2$ , и тогда  $(IT)A_1^{gp} = (IT)A_2^{gp}$ . В ряде случаев сборки высокоточных соединений метод групповой взаимозаменяемости является единственно возможным.

Для осуществления нормальной и ритмичной сборки необходимо ее непрерывное обеспечение достаточным количеством собираемых деталей в каждой группе. В связи с этим организация селективной сборки реально осуществляется только в условиях серийного или массового производства. При этом практически важно, чтобы внутри каждой группы собираемых деталей на сборке было обеспечено одинаковое количество валов и втулок. Это может быть достигнуто только при условии одинаковых законов распределения размеров комплектующих деталей (рис. 2.11, б). В противном случае на сборке скапливается большое число деталей разных групп, не комплектующих друг с другом.

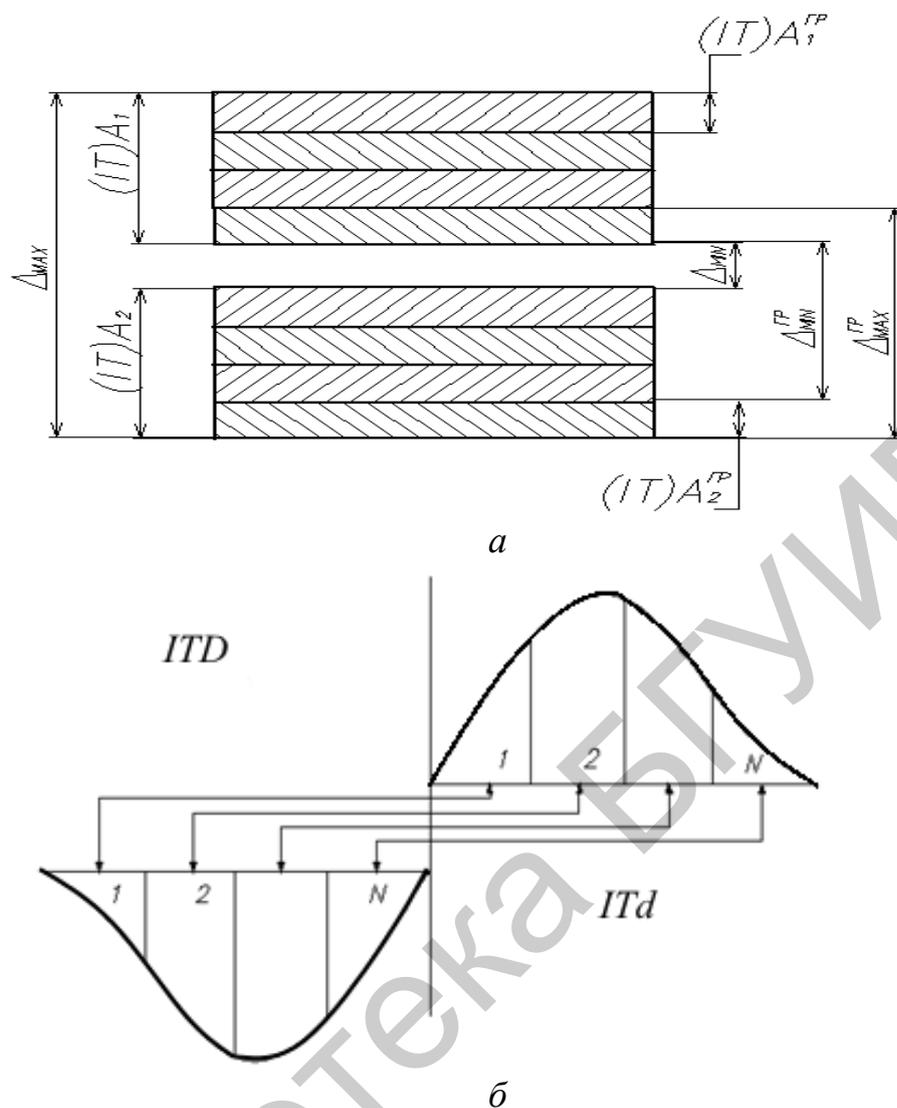


Рис. 2.11. Схема сортировки деталей на группы:  
*a* – схема определения групповых допусков;  
*б* – схема соответствия комплектовочных групп

## 2.2. Оборудование и материалы

1. Направляющая со зрительной трубой.
2. Индикаторный толщиномер и штангенциркуль.
3. Микроскоп.
4. Ирисовая диафрагма.
5. Держатели линз и пластин.
6. Образцы линз, пластин и призм Дове, сетка.
7. Кольцевой сферометр ИЗС-7.

## 2.3. Порядок выполнения работы

### 2.3.1. Измерение толщины

1. Толщиномер настроить на диапазон измерения 0–10 мм перемещением индикатора относительно нижнего упора.

2. Из набора деталей взять пару линз для склеивания с одинаковым внутренним радиусом. Измерить их суммарную толщину и толщину отдельных линз. У положительных линз толщина по оси наибольшая, у отрицательных – наименьшая. Для данной пары  $t_{\text{общ}}$  должно равняться  $t_1 + t_2$ .

3. Измерить толщину по центру и краю любой из пластин комплекта, что даст информацию о степени плоскопараллельности ее рабочих поверхностей.

### 2.3.2. Измерение радиуса кривизны

Объект измерений тот же, что и в п. 2.3.1. Выполнить следующие действия:

1. Установить на направляющую микроскоп и держатель с кольцом. Измерить штангенциркулем внутренний (для посадки выпуклых поверхностей) и внешний (для посадки вогнутых поверхностей) диаметры, найти значения  $r_{\text{внут}}$  и  $r_{\text{внеш}}$ .

2. Установить на удаленную поверхность кольца держателя сетку рисунком вовнутрь и, наводя на нее микроскоп, снять отсчет  $L_0$ .

3. Установив на кольцо внутренние припудренные поверхности пары линз под склейку, последовательно замерить  $L_{\text{полож}}$  и  $L_{\text{отриц}}$ .

4. Рассчитать радиусы обеих поверхностей по формуле  $R = \frac{r^2 + h^2}{2h}$ , где  $r_{\text{внут}}$  и  $r_{\text{внеш}}$  измерены на первом этапе, а  $h = L_{\text{отриц}} - L_0$  и  $h = L_0 - L_{\text{полож}}$ . Полученные значения  $R$  должны совпадать (с точностью измерений).

### 2.3.3. Метод групповой взаимозаменяемости

В табл. 2.3 приведены варианты задания для выполнения данного пункта лабораторной работы.

Таблица 2.3

Варианты задания

Составляющие звенья	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$(IT)A_1$ , мм	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,34
$(IT)A_2$ , мм	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2	0,25

1. Вычертить эскиз сборочной единицы.
2. Построить размерную цепь.

3. В соответствии с заданием (табл. 2.3) рассчитать размер  $A_{\Delta}$  и поле допуска  $IT_{\Delta}$  замыкающего звена сборочной единицы по методу «максимум – минимум». Определить число групп при групповой взаимозаменяемости.

4. Определить, какие пары линз попадают в интервал  $(IT)A = 0,24$ ;  $(IT)A^{гр} = 0,06$ , а также процент брака при сборке по методу «максимум – минимум».

5. Измерить детали и рассортировать детали по группам.

#### 2.4. Содержание отчета

1. Цели и задачи работы.
2. Краткие теоретические сведения и методики измерений.
3. Основные расчетные формулы и результаты расчетов.
4. Эскизы сборочных единиц, результаты измерений и вычислений по методу групповой взаимозаменяемости (селективной сборки).
5. Выводы.

#### 2.5. Контрольные вопросы

1. Для чего в лабораторной установке для контроля разрешения призм необходим параллельный ход лучей?
2. Назовите методы измерения радиуса кривизны линз.
3. Какие методы применяются для измерений толщины и диаметра линз?
4. Каковы виды контроля чистоты поверхностей оптических деталей?
5. Перечислите основные виды размерных цепей.
6. Какие задачи решаются при расчете размерных цепей?
7. Назовите методы достижения точности замыкающего звена.
8. В чем заключается метод групповой взаимозаменяемости?
9. Назовите условия, необходимые для осуществления метода групповой взаимозаменяемости.
10. В чем преимущества метода групповой взаимозаменяемости? Когда этот метод не применяется?

#### Список использованных источников

1. Окатов, М. А. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. В. Байгожин. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.
2. Креопалова, Г. В. Оптические измерения / Г. В. Креопалова, И. Л. Лазарев, Д. Т. Пуряев. – М. : Машиностроение, 1989. – 386 с.
3. Кирилловский, В. К. Оптические измерения : учеб. пособие / В. К. Кирилловский. – СПб. : ИТМО, 2005. – 68 с.
4. Русинов, М. М. Техническая оптика / М. М. Русинов. – М. : Машиностроение, 2010. – 473 с.

5. Стафеев, С. К. Основы оптики : учеб. пособие / С. К. Стафеев, К. К. Боярский, Г. Л. Башнина. – СПб. : Питер, 2006. – 336 с.

6. Андреев, А. Н. Оптические измерения / А. Н. Андреев, Е. В. Гаврилов, Г. Г. Ишанин. – М. : Логос, 2008. – 416 с.

7. Беспалов, В. В. Технология сборки машин : учеб. пособие / В. В. Беспалов. – Н. Новгород : НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 2014. – 204 с.

8. Козерук, А. С. Сборка и юстировка оптических приборов / А. С. Козерук. – Минск : БНТУ, 2015. – 96 с.

Библиотека БГУИР

## Лабораторная работа №3

### ЮСТИРОВКА ОПТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ГАЗОВОГО ЛАЗЕРА

**Цель работы:** изучить принцип действия газового лазера, устройство и области применения гелий-неоновых лазеров, ознакомиться с методами юстировки резонаторов He-Ne-лазеров, исследовать условия генерации газовых оптических квантовых генераторов (ОКГ).

#### 3.1. Краткие теоретические сведения

**Гелий-неоновый лазер** имеет рабочую длину волны 632,8 нм, расположенную в красной части видимого спектра. В качестве рабочего тела служит смесь гелия и неона в пропорции 5:1, находящаяся в стеклянной колбе под низким давлением (обычно около 300 Па) (рис. 3.1). Накачка энергии в активную среду лазера производится с помощью электрических разрядов в газе. Электроны, соударяясь с атомами газа, переводят их в возбужденное состояние с последующим излучением фотона. Благодаря актам вынужденного испускания световой луч, созданный в трубке, усиливается при прохождении через газовую плазму. Оптический резонатор (два точно выставленных зеркала на торцах трубки) задает преимущественное направление излучения. Часть потока фотонов отбирается из лазера через одно из зеркал, сделанное полупрозрачным. Другая часть отражается обратно внутрь лазера для поддержания вынужденного излучения.

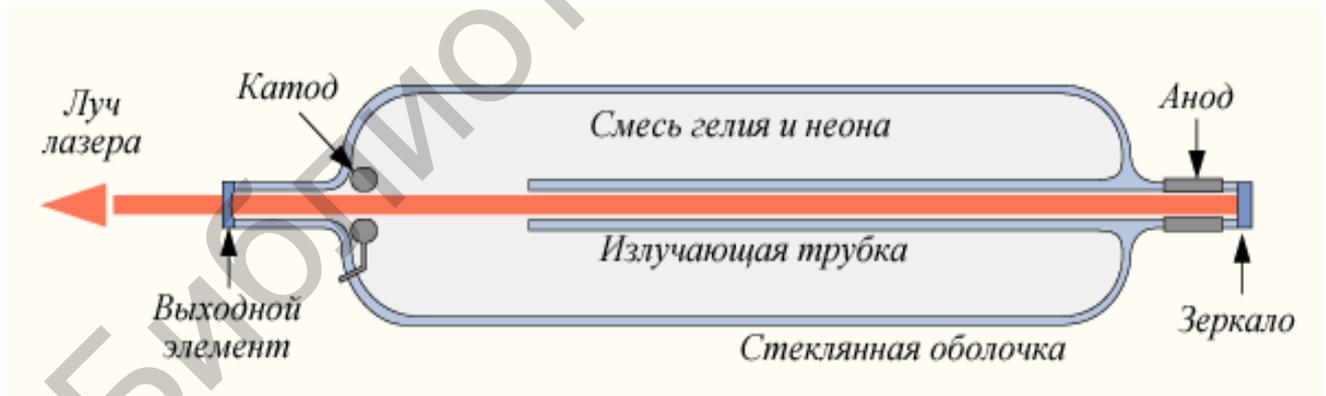


Рис. 3.1. Устройство гелий-неонового лазера

Энергия накачки подается от двух электрических разрядников с напряжением около 1000–5000 В (в зависимости от длины трубки), расположенных в торцах колбы. Резонатор обычно состоит из двух зеркал – полностью непрозрачного с одной стороны колбы (зеркало на рис. 3.1) и второго, пропускающего через себя около 1 % падающего излучения (выходной элемент на рис. 3.1).

Гелий-неоновые лазеры компактны, типичный размер резонатора составляет 0,15–2 м, их выходная мощность варьируется от 1 до 1000 мВт.

### 3.1.1. Принцип действия гелий-неонового лазера

В газовом разряде в смеси гелия и неона образуются возбужденные атомы обоих элементов. При этом энергии метастабильного уровня гелия  $2^1S$  и излучательного уровня неона  $3s$  ( $2p^55s$ ) (рис. 3.2) оказываются примерно равными – 20,616 и 20,661 эВ соответственно. Передача возбуждения между двумя этими состояниями происходит в процессе



и ее эффективность оказывается очень большой (\* показывает возбужденное состояние, а  $\Delta E$  – различие энергетических уровней двух атомов.) Недостающие 0,05 эВ компенсируются за счет кинетической энергии теплового движения атомов. Заселенность уровня неона  $2p^55s$  возрастает и в определенный момент становится больше, чем у нижележащего уровня  $2p$  ( $2p^53p$ ). Наступает инверсия заселенности уровней и среда способна к лазерной генерации.

При переходе атома Ne из состояния  $2p^55s$  в состояние  $2p^53p$  (стрелка *b*) испускается излучение с длиной волны 632,816 нм. Состояние  $2p^53p$  атома неона также является излучательным с малым временем жизни и поэтому это состояние быстро довозбуждается в систему уровней  $2p^53s$ , а затем и в основное состояние  $(2p)^0$ , либо за счет испускания резонансного излучения (излучающие уровни системы  $2p^53s$ ), либо за счет соударения со стенками (диффузия).

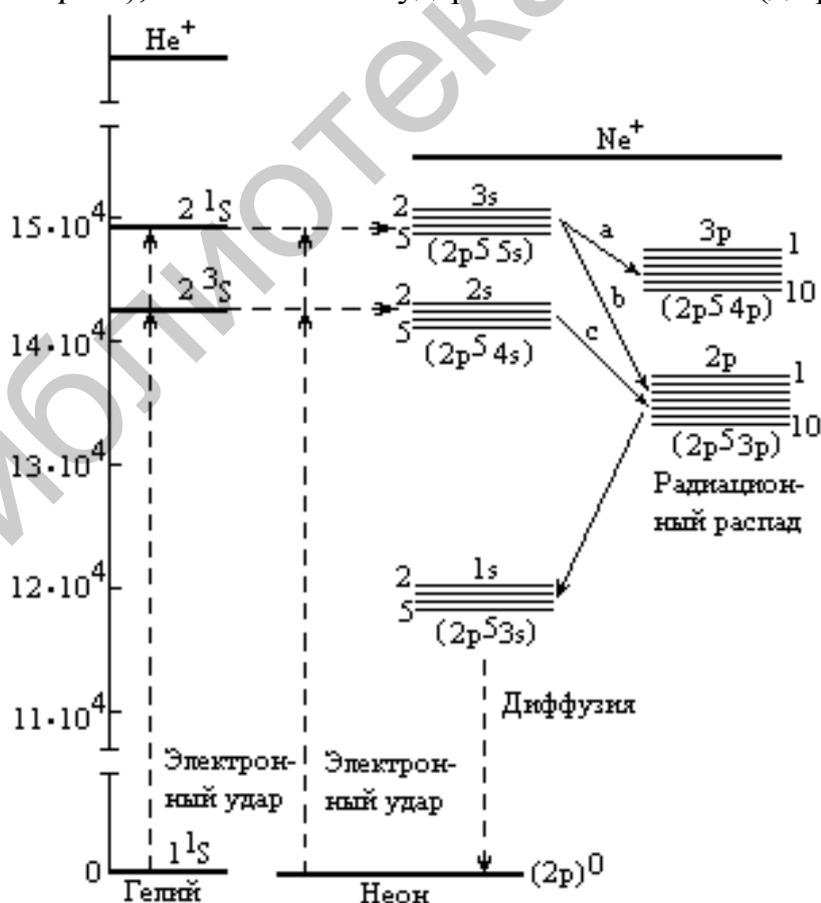


Рис. 3.2. Энергетические уровни и переходы в He-Ne-лазере

При правильном выборе зеркал резонатора можно получить лазерную генерацию и на других длинах волн: тот же уровень  $2p^55s$  может перейти на  $2p^54p$  с излучением фотона с длиной волны 3,39 мкм (переход *a*), а уровень  $2p^54s$  с энергией 19,77 эВ, возникающий при столкновении с метастабильным уровнем гелия  $2^3s$ , может перейти на  $2p^53p$ , испустив при этом фотон с длиной волны 1,15 мкм (переход *c*). Также возможно получить лазерное излучение на длинах волн 543,5 нм (зеленый), 594 нм (желтый) или 612 нм (оранжевый).

Спектральная ширина полосы излучения гелий-неонового лазера довольно мала и составляет около 1,5 ГГц. Ее значение определяется главным образом доплеровским уширением излучения атомов неона. Узость спектра генерации делает гелий-неоновые лазеры хорошими источниками когерентного излучения для использования в интерферометрии, голографии, спектроскопии, юстировке оптических систем и др.

### 3.1.2. Описание конструкции ОКГ типа ЛГ-75

ОКГ ЛГ-75 (рис. 3.3) состоит из оптического резонатора и активного элемента. Оптический резонатор образован сферическим 1 и плоским 2 зеркалами, закрепленными в стаканах 3. Стаканы жестко закреплены винтами 4 во фланцах 5, 6 и связаны между собой тремя направляющими инваровыми стержнями 7.

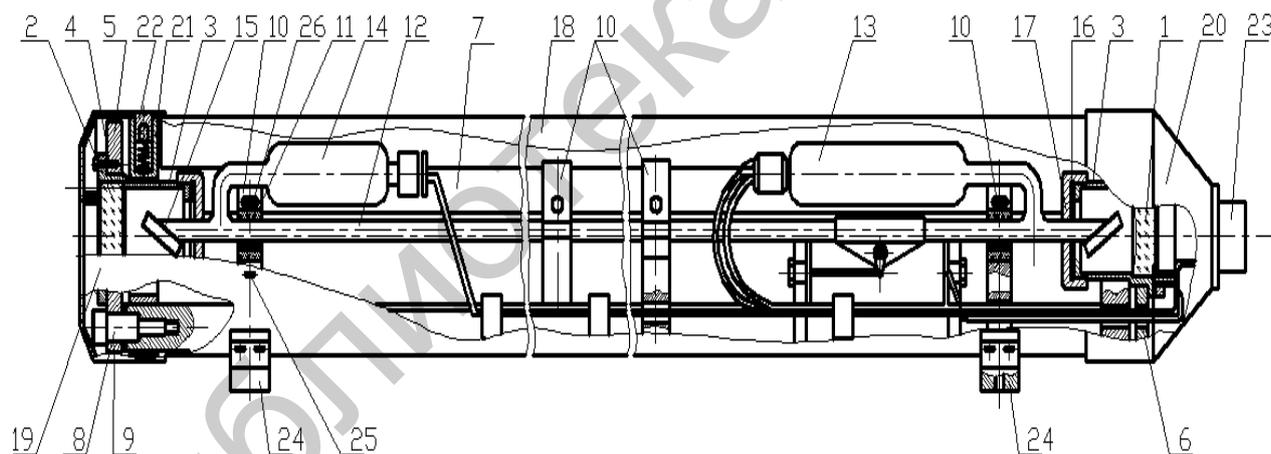


Рис. 3.3. Конструкция гелий-неонового лазера ЛГ-75

Фланцы 5 и 6 крепятся к инваровым стержням 7 винтами 8 через шайбы 9. Наличие шайб 9 позволяет изменять положение фланцев 5 и 6 с зеркалами 1 и 2 относительно оси оптического резонатора путем вращения в небольших пределах юстировочных винтов 8. Между инваровыми стержнями с помощью фланцев 10 закреплен активный элемент – газоразрядная трубка 12 с подогревным катодом 13 и анодом 14, заполненная смесью неона и гелия. Торцы газоразрядной трубки отшлифованы под углом Брюстера и закрыты выходными окнами 15. Пространство между выходными окнами 15 и зеркалами 1 и 2 герметизировано с помощью резиновых прокладок 16, прижимаемых гайками 17 к стаканам 3.

Оптический резонатор с активным элементом помещен в защитный корпус 18 и жестко в нем закреплен. Корпус 18 закрыт с торцов крышками 19 и 20, которые крепятся к фланцам 21 винтами 22. Высокое и накальное напряжения к газоразрядной трубке 12 подводится через разъем 23. Выход излучения осуществляется со стороны плоского зеркала 2. Для крепления прибора на корпусе 18 имеются скобы 24 с резьбовым отверстием в каждой из них.

Технические характеристики лазера ЛГ-75 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Технические характеристики лазера ЛГ-75

Характеристика	Значение
Длина волны излучения, мкм	0,6328
Мощность излучения, мВт	Не менее 250
Угловая расходимость луча, угл. мин	Не более 10
Долговечность активного элемента, ч	Не менее 500
Напряжение накала катода, В	6,3
Напряжение горения, В	2300–2500
Оптимальный ток разряда, А	0,04–0,06
Максимальная потребляемая мощность, Вт	400
Вес прибора, кг	Не более 12
Габаритные размеры прибора, мм	1170×90×90

### 3.1.3. Зависимость параметров генерации от точности резонатора

Юстировка резонатора, оптическая схема которого показана на рис. 3.4, – это точное выставление и ориентировка его зеркал, активного тела и других элементов внутри резонатора.

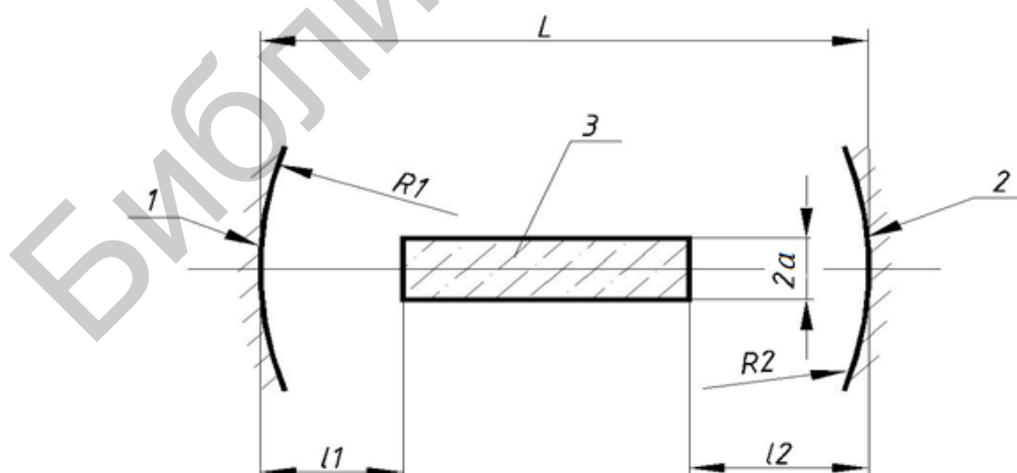


Рис. 3.4. Схема оптического резонатора:

1 – глухое зеркало; 2 – выходное зеркало; 3 – активная среда

Оптический резонатор считается отъюстированным, если:

- центры кривизны зеркал находятся на оси резонатора;
- ось активного элемента и ось резонатора совпадают.

От точности юстировки оптических элементов лазера существенно зависят и выходные параметры генерации. Так, энергетические, спектральные и другие характеристики излучения очень чувствительны к разъюстировке зеркал резонатора. Изменяется также модовая структура и пространственная индикатриса излучения. При разъюстировке резонатора апертурная диафрагма, роль которой может играть оправа зеркала или сечение активного элемента, все больше будет ограничивать пучок излучения. Дифракционные потери увеличиваются и при некоторой критической величине угла разъюстировки генерация прекратится. Для оценки угла разъюстировки исходят из критерия – расстояние от оси резонатора до края апертурной диафрагмы не должно быть меньше размера продольной моды  $TEM_{00}$ .

Для сферического неконфокального резонатора (см. рис. 3.4) критический угол разъюстировки определяется по формуле

$$\beta = \frac{\alpha - r_{TEM_{00}}}{XL}, \quad (3.1)$$

где  $\alpha$  – радиус активного элемента;

$L$  – длина резонатора;

$r_{TEM_{00}}$  – размер продольной моды излучения, определяется по формуле

$$r_{TEM_{00}} = \sqrt{\frac{\lambda R_{\text{ЭК}}}{2\pi} \left[ 1 + \left( \frac{L}{R_{\text{ЭК}}} \right)^2 \right]}, \quad (3.2)$$

$$R_{\text{ЭК}} = 2L \frac{\sqrt{q_1 q_2 (1 - q_1 q_2)}}{q_1 + q_2 - 2q_1 q_2} \quad (3.3)$$

$$\text{при } q_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, q_2 = 1 - \frac{L}{R_2}, \quad (3.4)$$

$$\text{при } q_1 = q_2 = q \quad R_{\text{ЭК}} = L \sqrt{\frac{1+q}{1-q}}, \quad (3.5)$$

$$X = \begin{cases} \left( 1 - \frac{l_2}{R_{\text{ЭК}}} \right) / (1 - q_1 q_2), \\ \left( q_2 - \frac{l_1}{R_{\text{ЭК}}} \right) / (1 - q_1 q_2), \end{cases} \quad (3.6)$$

где  $l_1$  и  $l_2$  – расстояния от торцов активного элемента до соответствующих зеркал резонатора, м;

$\lambda$  – длина волны основной моды, м;

$R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны зеркал, м.

В расчет берется наибольшее из двух уравнений значение  $X$ .

Для плоского резонатора критический угол для  $TEM_{00}$  находят из тех соображений, что разъюстировка эквивалентна внесению дополнительных потерь:

$$\alpha = (4\pi^2/3)/((\lambda/\alpha)\beta^2) . \quad (3.7)$$

Приравнивая (3.7) потерям на зеркалах, получаем

$$(4\pi^2/3)/((\lambda/\alpha)\beta^2) = 1 - R ,$$

откуда

$$\beta = (\lambda/2\pi)a\sqrt{(3(1 - R))} , \quad (3.8)$$

где  $R$  – произведение коэффициентов отражения зеркал.

Таким образом, для плоского резонатора критический угол разъюстировки значительно меньший, чем для конфокального резонатора. Это подтверждается также изображенной на рис. 3.5 зависимостью критического угла разъюстировки от радиуса кривизны зеркал различных резонаторов.

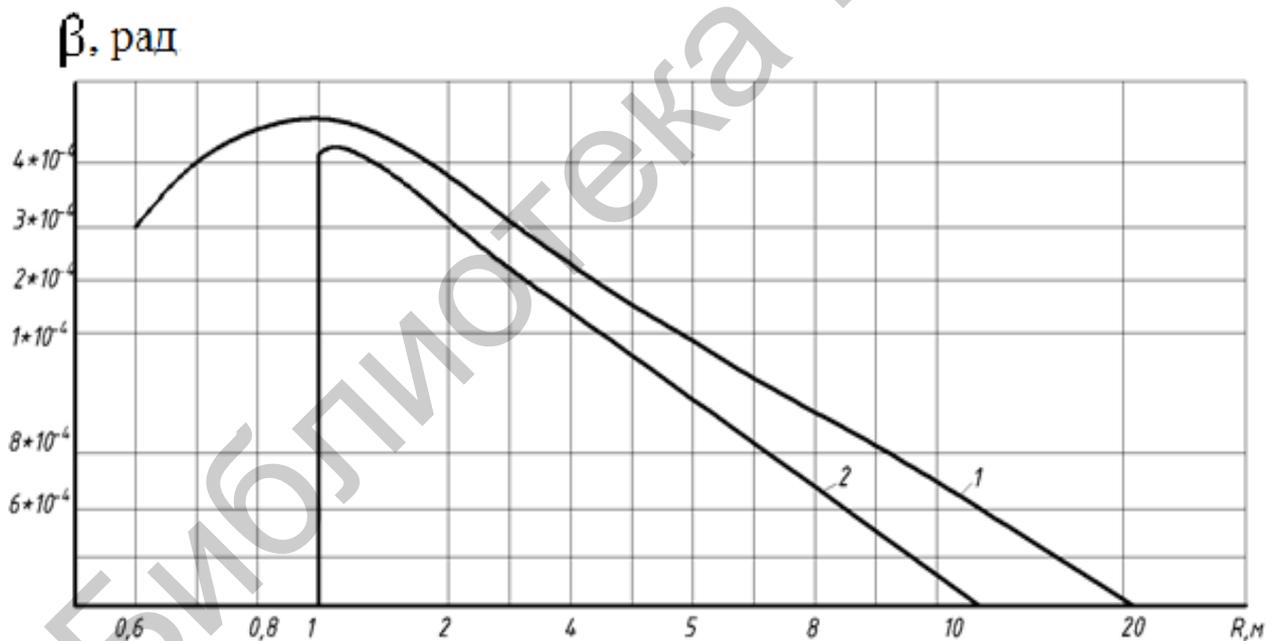


Рис. 3.5. Зависимость критического угла разъюстировки от радиуса кривизны зеркал:

1 – для сферического резонатора; 2 – для плоско-сферического резонатора

### 3.1.4. Методы юстировки оптических резонаторов

Главная цель юстировки – добиться генерации. Дальнейшие коррективы производятся по максимуму энергии генерации или по распределению поля излучения. Рассмотрим наиболее распространенные методы юстировки.

### 3.1.4.1. Автоколлимационный метод

При использовании автоколлиматора совмещают изображения автоколлимационной метки от заднего (глухого) зеркала при последовательной установке активного тела и других элементов резонатора (так называемый метод «на просвет») и, наконец, выходного зеркала. В случае газовых лазеров активный элемент (трубка с газом) должен быть центрирован, ориентирован по оси резонатора. В случае рубиновых лазеров из-за неоднородности кристалла изображение метки размывается, и активный стержень приходится ориентировать совмещением автоколлимационных меток от заднего зеркала, от торца стержня и от выходного зеркала (так называемый метод трех меток). Недостатки метода: не учитывается реальное смещение луча из-за градиента коэффициента преломления (после прохождения через кристалл рубина луч может отклоняться на несколько угловых минут): кроме того, невозможно избежать клинообразности стержня. При юстировке методом трех меток порог генерации будет выше.

В автоколлимационном методе точность установки определяется увеличением автоколлиматора. Если две удаленные точки видны из зрачка объектива под углом  $\alpha$ , то со стороны окуляра видимый угол (рис. 3.6) будет равен

$$\alpha' = M\alpha, \quad (3.9)$$

где  $M = \frac{f_{об}}{f_{ок}}$  – угловое увеличение системы.

Так как разрешающая способность глаза  $\alpha = 60''$ , то

$$\alpha_{пр} = 60'' \frac{f_{об}}{f_{ок}}. \quad (3.10)$$

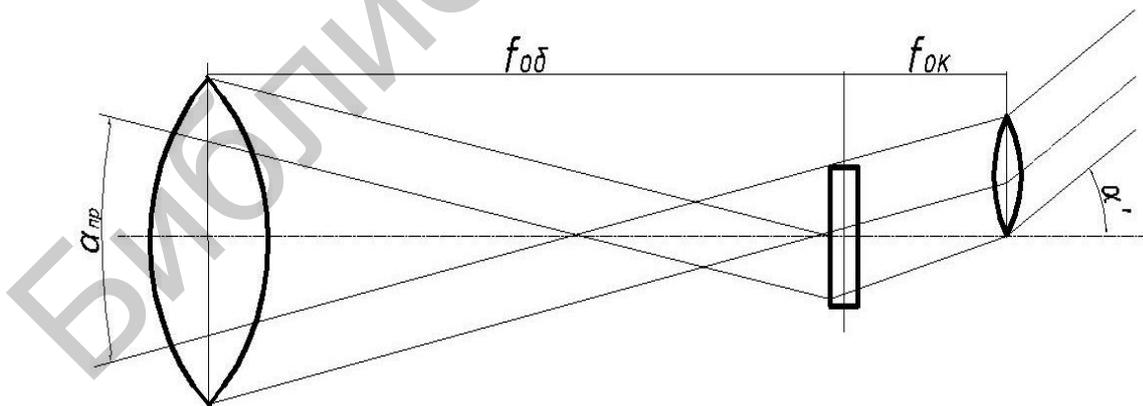


Рис. 3.6. Ход лучей в автоколлиматоре

### 3.1.4.2. Метод оптического рычага

В методе оптического рычага для юстировки применяется маломощный лазер (рис. 3.7). Луч от лазера 1 через отверстие в зеркале 2 попадает в резонатор 6 (активный элемент), отражается от его зеркал 4 и 5, отражается от зеркала 2 и попадает на экран 3, где наблюдается ряд светлых точек. Если точки исчезли, т. е. совместились с отверстием диафрагмы, то резонатор отъюстирован. Очевидно, точность юстировки зависит от  $L_p$  («плечо оптического рычага»).

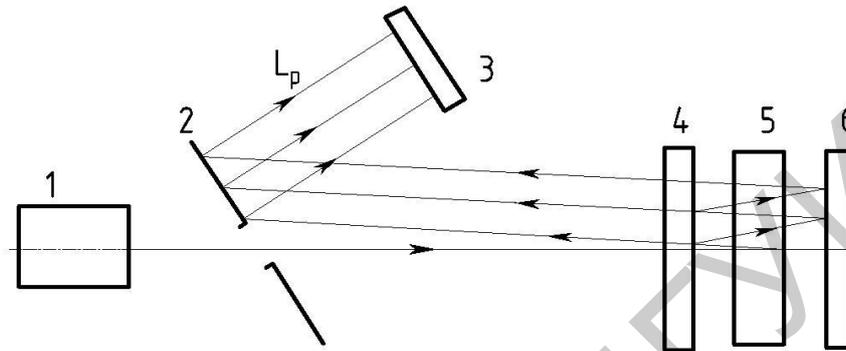


Рис. 3.7. Юстировка методом оптического рычага:  
1 – лазер; 2 – зеркало с отверстиями; 3 – экран; 4, 5 – зеркала резонатора;  
6 – активный элемент

### 3.1.4.3. Интерференционный метод

Интерференционный метод (рис. 3.8) заключается в том, что луч от маломощного лазера 1 проходит через отверстие экрана 2 и слаборассеивающую линзу 3, отражается от зеркал резонатора 4 и 5, давая на экране интерференционную картину в виде концентрических колец. Если картина четкая и центрирована относительно источника света, то зеркала параллельны, и резонатор отъюстирован.

Данный метод пригоден для плоских резонаторов. В случае сферических зеркал их следует диафрагмировать и работать лишь с параксиальными лучами.

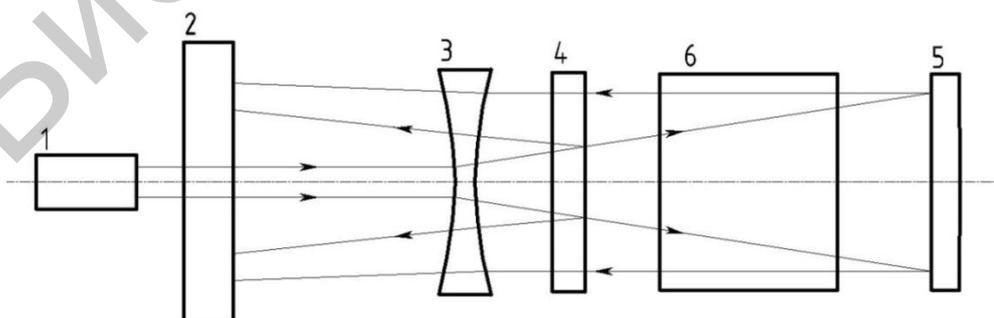


Рис. 3.8. Интерференционный метод юстировки резонатора:  
1 – маломощный лазер; 2 – экран; 3 – линза; 4, 5 – зеркала;  
6 – активный элемент

### 3.1.4.4. Юстировка с помощью диоптрийной трубки

Можно использовать монокуляр, подзорную трубу и т. п., предварительно выставив их на бесконечность. Диоптрийные трубки входят в комплект больших оптических скамей, изготавливаемых серийно. Для маломощных диоптрийных гелий-неоновых лазеров с полуконфокальными резонаторами этот метод применяется наиболее часто. Наблюдения ведут при горении разряда через выходящее зеркало **только с применением светофильтра.**

### 3.2. Оборудование и материалы

1. Большая оптическая скамья.
2. Сферический резонатор гелий-неонового лазера.
3. Маломощный юстировочный лазер.
4. Набор зеркал и линз с держателями.
5. Коллиматор.
6. Штангенциркуль.

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить технические описания используемых в работе приборов.
2. Оценить критический угол разъюстировки  $\beta$  для одного из гелий-неоновых лазеров с длиной волны излучения  $\lambda = 0,6328$  мкм (табл. 3.2).
3. Установить ОКГ на направляющую большой оптической скамьи.
4. Установить на направляющую технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ методом оптического рычага.

Таблица 3.2

Параметры гелий-неоновых лазеров

Модель	$L$ , м	$l$ , м	$R_1$ , м	$R_2$ , м	$\alpha$ , см
ЛГ-36А	1,5	1,2	10	$\infty$	0,5
ЛГ-56 (ЛГ-55)	0,3	0,25	1	$\infty$	0,1
ЛГ-75	1,0	0,96	2	$\infty$	0,5

5. Произвести юстировку оптического резонатора ОКГ методом оптического рычага.
6. Демонтировать технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ методом оптического рычага.
7. Установить на направляющую коллиматор для юстировки оптического резонатора ОКГ.
8. С помощью коллиматора определить остаточный угол разъюстировки и сравнить с результатом выполнения п. 2.
9. Установить на направляющую технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ интерференционным методом.

10. Произвести юстировку оптического резонатора ОКГ интерференционным методом.

11. Демонтировать технологическую оснастку для юстировки оптического резонатора ОКГ интерференционным методом.

12. Установить на направляющую коллиматор для юстировки оптического резонатора ОКГ.

13. С помощью коллиматора определить остаточный угол разъюстировки по результатам выполнения пп. 2, 8.

14. Сравнить и проанализировать результаты юстировки по пп. 5 и 10.

15. Оформить отчет о выполнении работы.

### **3.4. Содержание отчета**

1. Титульный лист.

2. Цель работы.

3. Краткие теоретические сведения.

5. Чертеж ОКГ.

6. Схемы юстировки ОКГ.

7. Расчет критического угла разъюстировки.

8. Результаты исследований (эпюры излучений и отражений).

9. Результаты вычислений критического и остаточных углов разъюстировки по пп. 2, 8 и 13.

10. Выводы по работе.

### **3.4. Контрольные вопросы**

1. Опишите принцип действия и устройство He-Ne-лазеров.

2. Что входит в конструкцию юстировочного узла?

3. Охарактеризуйте методы юстировки оптических резонаторов: автоколлимационный, оптического рычага и интерференционный.

4. Как выполняется юстировка оптического резонатора с помощью диоптрийной трубки?

5. Каковы оптическая схема и принцип работы автоколлиматора?

6. Опишите оптическую схему и принцип работы диоптрийной трубки.

### **Список использованных источников**

1. Стафеев, С. К. Основы оптики : учеб. пособие / С. К. Стафеев, К. К. Боярский, Г. Л. Башнина. – СПб. : Питер, 2006. – 336 с.

2. Погарев, Г. В. Оптические юстировочные задачи. Справочник / Г. В. Погарев, Н. Г. Киселев. – Л. : Машиностроение, 1989. – 260 с.

3. Крылов, К. И. Основы лазерной техники : учеб. пособие / К. И. Крылов, В. Г. Прокопенко, Б. А. Гарлыков. – Л. : Машиностроение, 1990. – 316 с.

4. Кэмруков, А. С. Основы методов расчета лазеров : учеб. пособие. Ч. 1 / под ред. Н. П. Козлова. – М. : МГТУ, 1989. – 224 с.

## Лабораторная работа №4

### ИЗУЧЕНИЕ ДЕЦЕНТРИЧНОСТИ И МЕТОДОВ ЦЕНТРИРОВКИ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

**Цель работы:** изучить требования к центрировке линз, виды децентричности и методы измерения децентричности изготовленных деталей, а также измерения децентричности оптических деталей.

#### 4.1. Краткие теоретические сведения

##### 4.1.1. Показатели децентрировки линз

Смещение поверхностей линз называется децентрировкой. Предельный размер децентрировки определяет допустимое несоответствие оптической оси линзы с ее механической осью, когда центр кривизны одной из поверхностей или оба центра не лежат на геометрической оси. Децентрировку каждой из поверхностей оценивают линейным значением сдвига соответствующего центра кривизны поверхности. На рис. 4.1. показана децентрированная линза 3, у которой центр кривизны  $O_1$  поверхности 1 лежит на геометрической оси линзы.

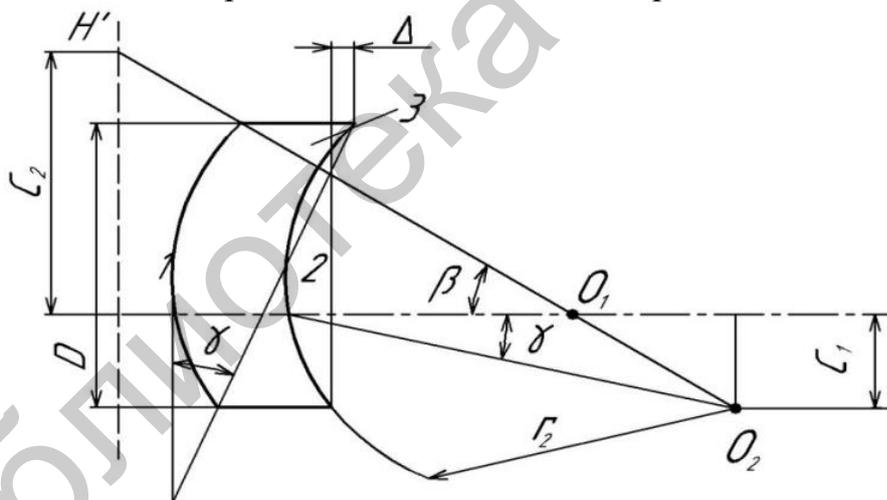


Рис. 4.1. Параметры децентрировки линзы

Децентрировку в этом случае оценивают одной из следующих величин:

- сдвигом  $C_1$  центра  $O_2$  кривизны поверхности 2;
- сдвигом  $O_2$  оптической оси в задней главной плоскости  $H'$  линзы;
- наибольшей разностью толщин  $\Delta$  на краях линзы;
- углом наклона  $\gamma$  поверхности 2 вокруг ее вершины по отношению к поверхности 1 ( $\beta$  – угол наклона оптической оси).

Эти величины связаны друг с другом приближенными отношениями:

$$c_2 = c_1(n - 1) \frac{f'}{r_2} = f' \gamma (n - 1),$$

$$\Delta \approx \frac{c_1 D}{r_2} = D\gamma,$$

$$\gamma = \frac{c_1}{r_2},$$

где  $n$  – показатель преломления материала линзы;

$f'$  – ее заднее фокусное расстояние;

$r_2$  – радиус кривизны поверхности 2;

$D$  – полный диаметр линзы.

На чертеже должно быть указано, какая именно из названных величин децентрировки имеется в виду.

#### 4.1.2. Методы центрирования круглых оптических деталей

Целью центрирования линзы является совмещение ее оптической и геометрической осей. Эта операция осуществляется с помощью центрировочных станков, в которых линза, обычно приклеиваемая к оправе, выравнивается так, чтобы ее оптическая ось совпадала с осью вращения патрона. Затем производится шлифовка края линзы. Основными методами центрирования являются:

1. *Механическое центрирование с помощью патронов сжатия* (рис. 4.2). Линза устанавливается между подпружиненными в аксиальном направлении соосными кольцевыми патронами так, чтобы центры ее кривизны лежали на оси вращения. Средняя точность (за счет трения при выравнивании) достижима только при малых радиусах кривизны.

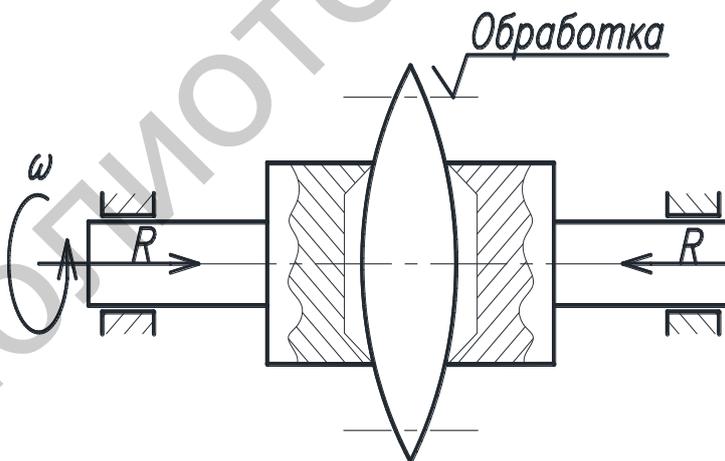


Рис. 4.2. Механическое центрирование с помощью патронов сжатия

2. *Оптическое центрирование с установкой по блику* (рис. 4.3). Приклеенная линза с помощью специальной оправки или в процессе затвердения смазки выравнивается при вращении вокруг оси обработки до тех пор, пока изображение  $L'$  малого источника света  $L$  не остановится (перестанет «танцевать»). Это указывает на положение центра  $O$  сферической поверхности на оси вращения. Метод обеспечи-

вает высокую точность центрирования, но требует высокой квалификации сборщика. Интенсивность отраженного изображения  $L'$  низка.

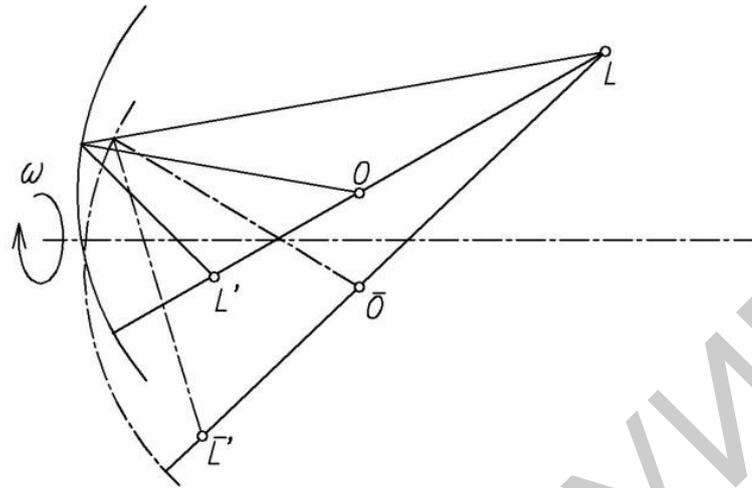


Рис. 4.3. Оптическое центрирование с установкой по блику

3. *Оптическое центрирование с установкой по прибору* (рис. 4.4). Как и при центрировании с установкой по блику, линза вращается до тех пор, пока изображение  $L'$  не остановится. Низкая чувствительность метода требует увеличения изображения  $L'$ . Интенсивность этого изображения высокая. Воздействие на изображение обеих сферических поверхностей может наблюдаться одновременно. Метод удобен для автоматизации процесса центрирования, т. к. положение изображения  $L'$  может быть оценено с помощью матрицы приборов с зарядовой связью.

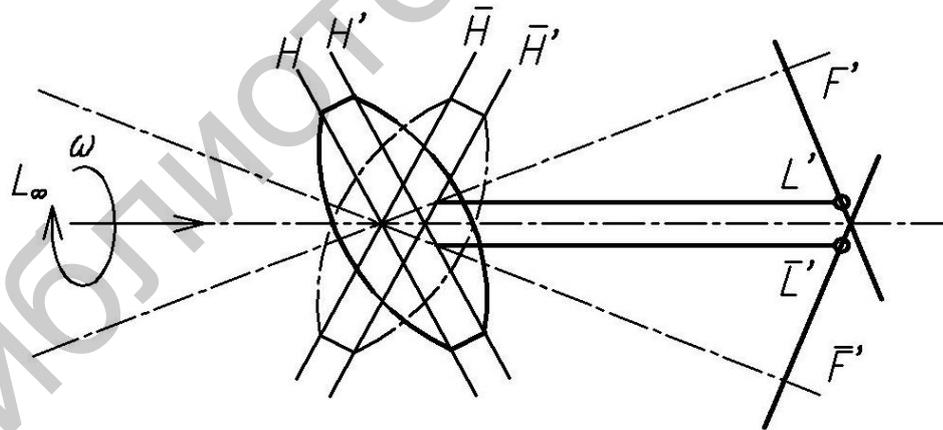


Рис. 4.4. Оптическое центрирование с установкой по прибору:

$L$  – источник света;  $L'$  – изображение источника света;  $O$  – центр кривизны;  $H, H'$  – главные плоскости;  $F'$  – фокус;  $\bar{L}, \bar{O}, \bar{H}, \bar{H}', \bar{F}'$  – точки после поворота линзы на  $180^\circ$  вокруг оси вращения

Преимуществом оптического центрирования с установкой по прибору по сравнению с установкой по блику является его большая чувствительность, которая может быть увеличена при наблюдении отраженного изображения через

микроскоп. Важнейшее преимущество этого метода заключается в том, что на каждой оптически эффективной поверхности системы возникает по одному отраженному изображению. Простая линза образует два изображения, которые могут наблюдаться отдельно и позволяют оценивать положение отдельных поверхностей относительно оси. Это дает возможность последовательной юстировки отдельных поверхностей и, следовательно, всей системы.

Величину децентрировки удобнее всего определять с помощью прибора СТ-41. Он представляет собой две видоизмененные трубки ЮС-13, смонтированные на общем основании (рис. 4.5).

Верхняя трубка состоит из источника света *1*, конденсатора *2*, наклонного зеркала с прорезанным в алюминиевом слое перекрестием *3*, объектива *18*, вспомогательного объектива *4*, экрана с прозрачной шкалой в центральной части *5* и окуляра *15* и поджимается к упругой призме *16*. С помощью зеркала *14* в систему введена вторая (нижняя) трубка, аналогичная верхней (позиции *7–13*). Эти трубки представляют собой автоколлимационные микроскопы с переменной сходимостью, которая обеспечивается перемещением объективов *13*, *18* вдоль осей их тубусов.

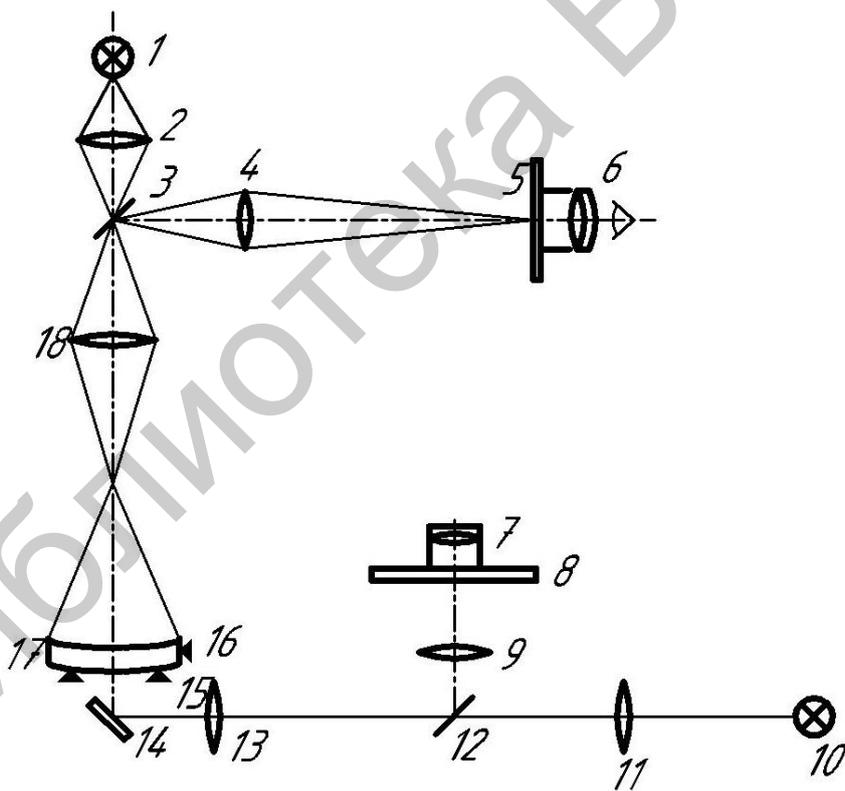


Рис. 4.5. Схема контроля децентрированности

На тубусе каждого имеется шкала предметных состояний в сантиметрах и указана соответствующая ей цена деления шкалы окуляра в микрометрах. Минимальная линейная погрешность измерения децентрировки составляет 2 мкм, угловая – 5'. Предметное расстояние трубок (от торца тубуса объектива до наблюдаемой плоскости) составляет от 60 мм до  $+\infty$  и от  $-\infty$  до –160 мм. Для

просматривания изображения, находящегося за пределами фокусировки, предусмотрено отсчетное перемещение самих трубок. При измерении верхнюю трубку настраивают на центр кривизны верхней поверхности и, прижимая линзу к упругой призме, вращают ее, наблюдая за биением автоколлимационного блока. Диаметр биения равен четырехкратной децентрировке ( $D = 4 C$ ). Смещение узловой точки можно измерить непосредственно в проходящих пучках параллельных лучей. Для этого нижнюю трубку настраивают на бесконечность, верхнюю – на фокальную плоскость линзы. Диаметр биения изображения дает удвоенную величину децентрировки. При склейке линз для совмещения их оптических осей пользуются такой же измерительной схемой. В особо ответственных случаях проверяют децентрировку каждой из поверхностей склеиваемого компонента по автоколлимации от соответствующих центров кривизны, производя расчет автоколлимационных точек и цены деления.

При повышенных требованиях к точности центрирование линзы производится после закрепления в оправке; обработке подвергаются соприкасающиеся поверхности линзы и оправы. Такая оправка должна иметь внутреннюю мелкую резьбу для крепления на центрирующей оправке. Погрешность центрирования линзы в оправке при использовании этого метода остается неизменной.

## **4.2. Оборудование и материалы**

1. Два автоколлимационных микроскопа (трубки Забелина ЮС-13).
2. Два блока питания на 12 В.
3. Горизонтальные направляющие и оптическая скамья.
4. Прибор СТ-41 с вращающимся столиком и опорным кольцом для линз.
5. Штангенциркуль, пинцет.
6. Набор линз в оправках.

## **4.3. Порядок выполнения работы**

### **4.3.1. Центрировка линз с помощью трубок Забелина**

1. Подготовить лабораторный макет следующим образом:
  - подсоединить блоки питания к трубкам Забелина;
  - проверить совпадение изображения крестика с центром сетки в обеих трубках;
    - если изображение не совпадает, то произвести юстировку трубок Забелина при помощи винтов на окуляре.
2. Установить образец (линзу) на рабочий столик.
3. Перемещением трубок по направляющим и объективов 13, 18 (см. рис. 4.5) вдоль осей их тубусов добиться четкого изображения крестика от блика линзы.
4. Вращением столика проверить центрирование линзы и определить величину децентрирования.

5. Произвести центрирование линзы (совместить изображения крестиков с центром сетки).

#### **4.3.2. Определение децентричности и центрировка линз на приборе СТ-41**

1. Изучить описание прибора СТ-41.
2. Определить базировку линз, подлежащих измерению, выбрать и установить цену деления микроскопа.
3. Установить последовательно линзы на кольцо и отрегулировать упор относительно их диаметра.
4. Включить источник света прибора и, наблюдая в окуляр вертикального микроскопа, поймать изображение светящейся автоколлимационной точки и измерить величину децентричности.
5. Переустановить линзу на другую поверхность и повторить измерение децентричности для автоколлимационной точки второй поверхности. Допускается сделать измерение без переустановки, используя горизонтально расположенный микроскоп.
6. Закрепить линзу в оправке с помощью технологической замазки.
7. Установить линзу на рабочий стол прибора. Вращая линзу с помощью ролика, замерить величину начальной децентрировки обеих ее поверхностей относительно оптической оси. Результат измерений записать в отчет.
8. Меняя положение линзы в технологической оправке с помощью пинцета, добиться минимальной децентричности обеих поверхностей линзы относительно оптической оси. Результат измерений записать в отчет.
9. Оценить уменьшение величины децентричности в процентах.

#### **4.4. Содержание отчета**

1. Цель работы.
2. Требования к центрировке линз.
3. Методы контроля децентричности.
4. Результаты измерений.
5. Анализ результатов и выводы по работе.

#### **4.5. Контрольные вопросы**

1. Что является признаками децентрировки линз?
2. Как влияет децентричность линз на качество изображения?
3. Назовите основные методы измерения децентричности.
4. Для чего в приборе СТ-41 задействованы два микроскопа?
5. Чем объясняется повышенная точность автоколлимационного метода контроля центрировки?
6. Назовите основное ограничение метода центрирования с помощью патронов сжатия.

### Список использованных источников

1. Погарев, Г. В. Оптические юстировочные задачи. Справочник / Г. В. Погарев, Н. Г. Киселев. – Л. : Машиностроение, 1989. – 260 с.
2. Кирилловский, В. К. Оптические измерения / В. К. Кирилловский. – СПб. : ГИТМО, 2002. – 387 с.
3. Окатов, М. А. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов, Э. А. Антонов, А. В. Байгожин. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.

Библиотека БГУИР

## ОПИСАНИЕ ПРИБОРА «АГАТ-М» И ПОРЯДОК РАБОТЫ С НИМ

«Агат-М» – это портативный двухканальный виброанализатор, а также прибор двухплоскостной динамической балансировки вращающегося оборудования. Предназначен для измерения и анализа параметров вибрации, вибромониторинга, динамического уравнивания роторов в собственных опорах. Программное обеспечение «Агат-Протокол», поставляемое с прибором, обеспечивает обработку и хранение данных балансировок.

Прибор имеет функцию экспресс-диагностики подшипников качения, которая по однократному замеру позволяет определить дефекты монтажа, зарождающиеся дефекты подшипников, а также степень их износа.

Технические характеристики:

частотный диапазон измерений.....	2 Гц – 10 кГц
разрядность АЦП .....	14 бит
интегрирование .....	аналоговое одинарное и двойное
погрешность измерений .....	< 5 %
количество линий спектра .....	100, 200, 400, 800
длина выборки сигналов .....	256, 512, 1024, 2048
число точек на характеристике.....	100
общий объем памяти.....	2 Мбайт
область данных памяти/ПО .....	1,5 Мбайт/0,5 Мбайт
скорость обмена с ПК.....	программируемая: 9600–115 200 бод
питание.....	встроенный аккумулятор 1,6 А·ч, сетевой блок питания
длительность питания от аккумуляторов .....	≥ 6 ч

Запуск измерений может происходить в свободном режиме, от отметчика или от сигнала. Функции обработки: общий уровень, пик-фактор, амплитуда/фаза, спектр, форма сигнала, спектры огибающей сигнала, одно- и двухканальные выбег и временные характеристики.

Комплект прибора включает:

- 1) датчик вибрации АС102-1А (2 шт.);
- 2) установочный магнит для датчика для неровных поверхностей;
- 3) установочный магнит для плоских поверхностей;
- 4) щуп для датчика;
- 5) лазерный отметчик КР-020Л с метками;
- 6) электромагнитный отметчик КЕ-010;
- 7) магнитная стойка для отметчика КР-020Л;
- 8) импульсный молоток;
- 9) комплект кабелей;
- 10) программное обеспечение «Агат-Протокол»;
- 11) блок сетевого питания.

Измерительный блок прибора (рис. П.1.1) состоит из металлического пылезащищенного корпуса, монохроматического дисплея с подсветкой, панели разъемов для подключения внешних устройств, клавиатуры с тактильным эффектом и ремешка для переноски.



Рис. П.1.1. Прибор «Агат-М»:

*а* – внешний вид лицевой панели; *б* – панель разъемов (слева направо: вход для подключения отметчика, вход для подключения блока питания, измерительный вход Б, последовательный интерфейс RS-232C, измерительный вход А)

Клавиши имеют следующее назначение:



Ввод текущего пункта меню, ввод символа, подтверждение



Сброс, отмена, возврат в предыдущее меню



Клавиши навигации – перемещение селектора (курсора) по пунктам меню, полям



«Свет» – включение/выключение подсветки дисплея



«Питание» – включение/выключение прибора



«f» – функциональная клавиша; ее назначение зависит от текущего режима работы и указывается в правом нижнем углу прибора

Также на клавиатуре расположены индикатор нажатия клавиш прибора и индикатор режима зарядки аккумуляторной батареи.

Значение информации в областях дисплея пояснено на рис. П.1.2.



Рис. П.1.2. Дисплей прибора

Работа с программным обеспечением реализована по способу «окон» («дисплеев»). Возможно масштабирование графических данных.

### П.1.1. Подготовка к работе

Имеющиеся в комплекте датчики (акселерометры) АС102-1А могут быть установлены на плоскую или цилиндрическую поверхность на прилегающих магнитах, а также на шпильке 1/4-28. Если это невозможно, измерения проводятся с помощью прилагаемого в комплекте щупа, при этом щуп приворачивается к датчику вместо магнита, а измерения ведут, удерживая датчик рукой.

Датчики должны иметь надежный контакт с поверхностью объекта измерений. Перед установкой датчика необходимо на месте установки снять слой краски и удалить возможные загрязнения. Магнит или щуп должен быть плотно соединен с датчиком. При установке на шпильку датчик должен быть повернут так, чтобы он касался поверхности объекта измерений всей плоскостью основания. В процессе измерения датчик и соединительный кабель должны быть неподвижны.

При использовании щупа верхняя граница частотного диапазона измерений составляет не более 200 Гц, при установке датчика на магнит – 5000 Гц, на шпильку – 10 000 Гц.

Усиление измерительного сигнала настраивается автоматическим регулятором уровня, что отображается в нижней части дисплея (см. рис. П.1.2).

Синхронизирующий сигнал отметчика КР-020Л служит для точного определения частоты вращения ротора, а также для синхронизации измерений при замерах амплитуды/фазы оборотной составляющей вибрации, гармонического спектра, синхронного сигнала и снятия разгонов/выбегов. Для запуска отметчика используются специальные светлые контрастные метки объемного отражения. Отметчик при достаточной контрастности метки обеспечивает фор-

мирование четких запускающих импульсов (по переднему краю метки) при установке его на расстоянии 0,1–0,4 м от поверхности.

Электромагнитный отметчик КЕ-010 предусматривает использование в качестве нулевой метки выступ (бобышку, головку болта и пр.) из магнитного материала высотой не менее 2 мм или отверстие в однородном магнитном материале (например, ротора или полумуфты) диаметром не менее 6 мм и глубиной не менее 3 мм. При использовании подобных отметок устойчивый синхронизирующий сигнал формируется фазовым отметчиком при жесткой его установке на расстоянии 2–3 мм от метки.

Отметчики должны жестко устанавливаться на магнитный штатив или специальный кронштейн и подключаться к соответствующему входу прибора специальным кабелем, входящим в комплект.

Поля контроля и настройки отметчика расположены во всех формах установки параметров измерений, где требуется использование отметчика оборотов (рис. П.1.3). Автоматическая установка порога срабатывания отметчика производится нажатием клавиши «f». Порог можно установить вручную, используя клавиши навигации «Вверх» и «Вниз».



Рис. П.1.3. Поле настройки порога срабатывания отметчика

### П.1.2. Режимы работы. Проведение измерений

Основное меню прибора содержит следующие пункты: «Анализатор», «Диагностика подшипников», «Балансировка», «Коллектор», «Просмотр данных», «Установки», «Дополнительные функции».

В режиме *анализатора* можно проводить измерения:

1) спектра:

а) реальный – асинхронный (зависимость амплитуды вибрации от частоты с заданным частотным диапазоном и разрешением), синхронный (зависимость амплитуды вибрации от гармонического коэффициента с заданным гармоническим диапазоном и разрешением), порог (спектр собственных частот);

б) спектр огибающей;

в) третьоктавный (определение мощностей вибрации в дБ в 33-х стандартных полосах частот);

2) формы сигнала:

а) реальные измерения – асинхронного типа запуска (для временного диапазона), синхронного типа запуска (для гармонического диапазона), порогового типа запуска (форма сигнала при собственных колебаниях);

б) форма огибающей;

3) общего уровня вибрации:

а) стационарный способ – асинхронного типа запуска (общий уровень вибрации в заданной полосе частот) и синхронного (амплитуда/фаза вибрации первой гармонической составляющей оборотной частоты агрегата);

б) измерение пик-фактора (отношения пикового значения вибрационного сигнала к среднеквадратичному) – во временном и гармоническом диапазоне;

в) разгон/выбег – получение АЧХ и ФЧХ первой гармонической составляющей оборотной частоты.

При получении амплитуды и фазы вибрации на основной оборотной частоте поля в окне настроек режима анализатора заполняются следующим образом (рис. П.1.4): тип измерений – уровень; представление типа измерений – стационарный; тип запуска – синхронный; единицы измерения – на выбор единицы вибро смещения, вибро скорости или вибро ускорения; представление единиц измерения – по умолчанию соответственно размах, среднеквадратичное значение или пик; вход прибора – А или Б; количество усреднений  $N$  – из диапазона 0–100; количество периодов обработки сигнала « $P_n$ » – 10 или 50; количество замеров – из диапазона 1–100.

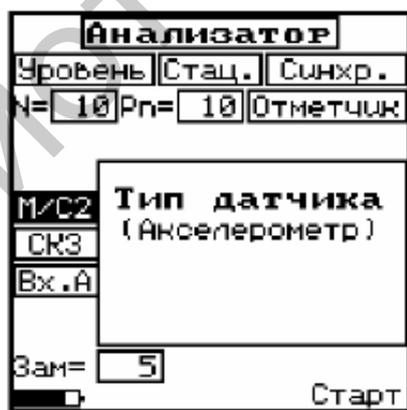


Рис. П.1.4. Установка параметров замера амплитуды/фазы вибрации на оборотной частоте

Для перехода к измерениям необходимо нажать кнопку « $f$ » («Старт»), для прерывания измерений – кнопку «Сброс».

После настройки измерительного тракта прибор выполняет заданное количество замеров с установленным числом усреднений измерений. Слева от графического дисплея выводится номер текущего усреднения, а на дисплее отоб-

ражается временная развертка значений амплитуды вибрации с заданным количеством замеров (в случае одного замера просто выводится значение амплитуды и фазы вибрации на оборотной частоте) (рис. П.1.5).



Рис. П.1.5. Экран результатов измерения амплитуды/фазы на основной оборотной частоте

Данные измерений слева направо: значение амплитуды вибрации, соответствующее выбранному курсором замеру; значение фазы вибрации данного замера; номер замера. В левом нижнем углу дисплея отображается значение оборотной частоты агрегата, в правом нижнем – время проведения измерений.

По окончании измерений курсор устанавливается на замер с максимальным уровнем вибрации. Нажатием клавиши «Сброс» осуществляется выход в диалог записи данных замера. При записи их можно приписать к агрегату, на котором проводится текущая балансировка.

В режиме *диагностики подшипников* прибор позволяет определить наличие зарождающихся дефектов подшипников, а также дефектов их монтажа и износа. Методика применяется для радиальных и радиально-упорных шариковых подшипников качения легких и средних серий диаметров с посадочными диаметрами в диапазоне 20–200 мм; возможный частотный диапазон работы агрегата 750–6000 об/мин. Результаты диагностики, выводимые на дисплей, состоят в заключениях типа «Дефекты отсутствуют», «Незначительные дефекты» (при этом допустима дальнейшая эксплуатация, но с учащением диагностики), «Значительные дефекты» (дальнейшая эксплуатация недопустима).

Режим *балансировки* предусматривает динамическую балансировку агрегатов в собственных опорах с использованием для размещения корректирующих грузов (или снятия массы) до двух плоскостей коррекции и с использованием для контроля параметров вибрации до четырех измерительных точек.

Процедура *одноплоскостной балансировки* (рис. П.1.6, а) с одной или двумя измерительными точками (1 и 2 на рис. П.1.6, а) сводится к отысканию чувствительности вибрации опоры (опор) к дисбалансу в выбранной для коррекции плоскости А и отысканию по этой чувствительности (коэффициентам влияния) необходимых корректирующих масс. Для этого необходимо проделать как минимум три пуска. Первый («Исходная вибрация») – для определения исходной вибрации опор; второй («Пробный пуск 1») – для определения чувствительно-

сти опор. По данным пробного пуска прибор рассчитывает коэффициенты влияния, а также величину и место установки корректирующего груза. После его установки осуществляется третий, контрольный пуск («Основной пуск 1») и при необходимости устанавливаются дополнительные корректирующие массы.

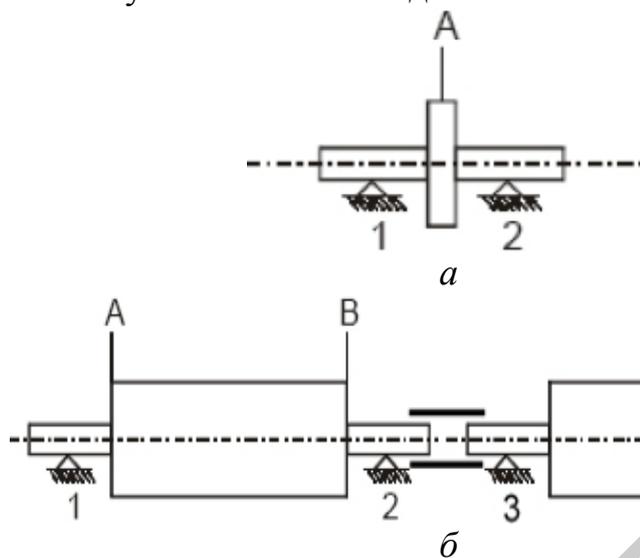


Рис. П.1.6. Схемы балансировки с применением прибора «Агат-М»: *а* – одноплоскостной; *б* – двухплоскостной

Процедура двухплоскостной балансировки с 2–4-мя измерительными точками (1, 2, 3, 4 на рис. П.1.6, б) сводится к отысканию чувствительности вибрации опор к дисбалансам в выбранных для коррекции плоскостях *A* и *B* и отысканию по этой чувствительности (коэффициентам влияния) необходимых корректирующих масс.

При двухплоскостной регулировке с двумя измерительными точками дисплей установки параметров балансировки представлен на рис. П.1.7.

«Выб. агр-та» – поле выбора балансируемого агрегата из списка сохраненных в памяти прибора.

«Новый агр.» – поле, задающее новый объект балансировки.

«Имя» – поле задания имени нового агрегата.

«N бал.» – поле задания номера выполняемой на данном агрегате балансировки из диапазона 1–500.

«Пл. корр.» – поле установки количества плоскостей коррекции (1, 2).

«Изм. т-к» – поле установки количества измерительных точек (1, 2, 3, 4).

«Плоскость 1», «Плоскость 2» – поля ввода названий плоскостей коррекции, просмотра и редактирования значений коэффициентов влияния для каждой точки измерения.

«Изм. точка 1 (2, 3, 4)» – поля ввода названий измерительных точек, направления измерений (вертикальное, поперечное, неопределенное) и контроля входа прибора, соответствующего данной измерительной точке.

«Единицы измерения» («мм/с», «мкм», «м/с<sup>2</sup>») – установка единиц измерения амплитуды вибрации.

Балансировка	
Выб. аэрт-та	Новый Аэр.
Имя	РОТОР
№бал.	1
Пл.корр.	2
Изм.т-к	2
Плоскость1	Плоскость2
Изм.точка1	Изм.точка2
МКМ	РАЗМ
Тек.пуск	1
Метод корр.	Нанесение
Удал.дан-х	
Сохран.дан-х	Установки
Пуск	

Рис. П.1.7. Меню параметров балансировки

«Представление величин» («СКЗ», «РАЗМ», «ПИК») – установка представления единиц измерения.

«Тек. пуск» – поле вывода порядкового номера текущего пуска.

«Метод корр.» – выбор метода коррекции неуравновешенности (нанесение или снятие массы).

«Дан. пусков» – поле просмотра полученных при выполнении балансировки данных пусков и расчета корректирующих масс (отображается только при наличии данных).

«Удал. дан-х» – поле удаления данных, полученных при пусках, и обнуления коэффициентов влияния.

«Сохран. дан-х» – поле сохранения данных производимой балансировки.

«Установки» – меню настройки дополнительных параметров балансировки (рис. П.1.8).

Балансировка	
Установки	
Кол-во периодов:	10
Способ накопл.	Усред.
Количество усред.	10
Пред-ие ед-ц изм.	Да
ММ/С	СКЗ
МКМ	РАЗМ
М/С2	ПИК
Исп.каналов	Вх.А&Б
Вект.выбр.	Измерение
Пуск	

Рис. П.1.8. Настройка дополнительных параметров балансировки

«Кол-во периодов» – выбор количества периодов обработки сигнала при измерении амплитуды/фазы вибрации из значений 10 или 50.

«Способ накопл.» – выбор типа накопления данных при измерении амплитуды/фазы вибрации (усреднение или автовыбор).

«Кол-во усред.» – выбор количества усреднений из диапазона 3–100.

«Предс-ние ед-ц изм.» («Да», «Нет») – установка способа представления единиц измерения; включение этой опции позволяет изменить их представление по умолчанию в трех полях, находящихся ниже.

«Исп. каналов» – выбор измерительных каналов для проведения измерений (в случае выбора «Вх. А&Б» измерения в точках 1 и 3 будут производиться каналом А, а в точках 2 и 4 – каналом Б).

«Вект. вибр.» («Измерение», «Ручной ввод») – выбор режима работы балансировочной программы. В режиме измерения балансировка ведется с измерением вибрационных характеристик прибором, в режиме ручного ввода данные вибрационных характеристик вводятся пользователем с клавиатуры в балансировочный калькулятор.

Для проведения двухплоскостной балансировки с двумя точками измерения (рис. П.1.9) датчик входа А устанавливается в левую опору в точку 1, а датчик входа Б – на правую в точку 2 в горизонтальном направлении.

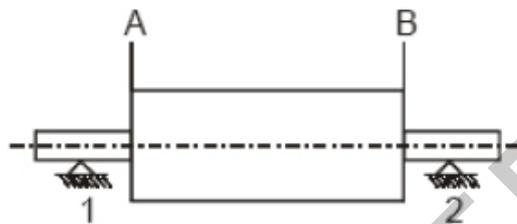


Рис. П.1.9. Схема балансировки 2×2

Лазерный отметчик оборотов устанавливается на магнитной стойке в одной плоскости с датчиками (рис. П.1.10) и соединяется кабелем с прибором. Градуировка ротора в плоскостях коррекции производится против направления его вращения.

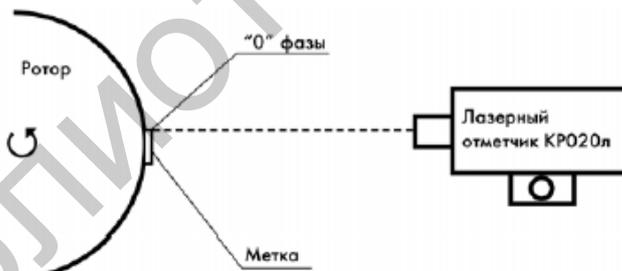


Рис. П.1.10. Установка лазерного отметчика

Измерения параметров вибрации от пуска к пуску необходимо производить на одной и той же выбранной частоте вращения агрегата, отличной от резонансной.

Пробные и корректирующие грузы необходимо устанавливать на один и тот же выбранный радиус.

Устанавливаем следующие параметры балансировки: новый агрегат – «Ротор»; номер балансировки – 1; количество плоскостей коррекции – 2; количество измерительных точек – 2; имена плоскостей – «Плоск. А» и «Плоск. В»; имена точек – «Точка 1», «Точка 2»; направления измерений – поперечные;

единицы измерения – «мкм»; метод коррекции – «нанесение»; количество периодов – 10; способ накопления – усреднение; число усреднений – 10; представление единиц измерения – «мкм» («размах»); каналы – «Вх. А&Б»; векторы вибрации – «Измерение».

Для начала балансировки необходимо нажать клавишу «f» («Пуск»). Так как коэффициенты влияния неизвестны, следует производить пробные запуски.

После пуска в нижней части дисплея (см. рис. П.1.11) отображается частота вращения агрегата. Если этого не происходит, следует настроить чувствительность отметчика. Для измерения вибрации в точках 1 и 2 курсор устанавливается в поле «Точки 1&2» и нажимается клавиша «Ввод». После проведения заданного количества измерений на дисплей выводятся данные исходной вибрации в точках измерения.



Рис. П.1.11. Дисплей измерения исходной вибрации

Перед проведением первого пробного пуска необходимо установить на плоскость *A* пробный груз и ввести его данные (масса и угол) в соответствующие поля. После нажатия «f» прибор перейдет в режим первого пробного пуска, аналогичный режиму получения данных исходной вибрации (рис. П.1.11). После проведения усреднений на дисплей таким же образом выводятся данные амплитуды/фазы вибраций в точках.

Следующий экран – диаграмма первого пробного запуска (рис. П.1.12).



Рис. П.1.12. Диаграмма первого пробного запуска

На ней отображаются точки окончания векторов амплитуды/фазы вибрации в полярных координатах. Расстояние от центра координат до точки является амплитудой, а угол – фазой. Для увеличения диаграммы любой точки следует установить курсор в поле «Т1» или «Т2» и нажать «Ввод».

▲ – конец вектора исходной вибрации, □ – конец вектора вибрации при первом пробном запуске. Векторы, проведенные из точек ▲ в точки □, являются векторами влияния первого пробного груза на вибрацию в точках измерения.

Перед проведением второго пробного пуска необходимо определить, снять или оставить первый пробный груз на плоскости А. Если он будет оставлен, его данные будут учтены при расчете результирующего корректирующего груза.

Далее на плоскость В устанавливается второй пробный груз и проводится второй пробный запуск с получением аналогичной диаграммы запуска. Конец вектора вибрации при этом обозначается символом ■.

Перед продолжением балансировки следует определить, снимается или оставляется второй пробный груз на плоскости В.

Следующий экран – общая диаграмма пробных запусков, объединяющая векторы, полученные на первом и втором запусках. После нажатия «f» производится расчет коэффициентов влияния и корректирующих масс и на дисплей выводятся данные о величине и фазе расположения требуемых корректирующих масс для каждой плоскости (рис. П.1.13).

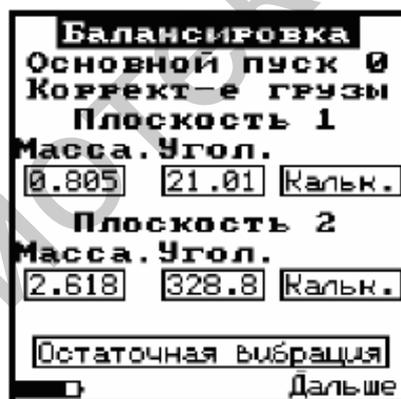


Рис. П.1.13. Экран расчетных данных корректирующих масс

Для устранения дисбаланса агрегата необходимо установить корректирующие грузы на выбранный радиус в соответствующих фазах.

Программа предусматривает расчет остаточной вибрации в измерительных точках, ожидаемой после установки корректирующих грузов (опция «Остаточная вибрация»). По результату расчета можно сделать вывод о целесообразности установки корректирующих грузов в плоскости коррекции. Следующий экран – подтверждение либо отмена установки корректирующих грузов, после чего прибор переходит в режим установок, просмотра данных балансировок и проведения контрольных запусков.

Основной запуск – запуск с установленными корректирующими массами для определения параметров остаточной вибрации – производится аналогично описанным выше. Если уровни остаточной вибрации для каждой точки измерения соответствуют нормам для данного типа оборудования, то из режима выходят нажатием клавиши «Сброс». Если остаточная вибрация слишком велика, следует перейти на следующий экран, отображающий данные дополнительных корректирующих грузов, после установки которых проводят второй основной запуск. Максимальное число основных запусков – четыре.

Данные о вибрациях на всех запусках и о корректирующих грузах сводятся в таблицы меню данных балансировки («Дан. пусков»). Это меню также содержит опции разгрузки данных на ПЭВМ и векторного калькулятора, с помощью которого можно складывать векторы корректирующих масс и раскладывать их по фиксированным углам или массам.

В режиме *коллектора* прибор работает в качестве сборщика данных в системе прогнозируемого обслуживания оборудования совместно с базами данных (БД) на персональном компьютере. В БД формируется требуемая пятиуровневая структура «станция – агрегат – точка – замер – данные», описываются соответствующие измерительные датчики, оборотные и технологические параметры работы агрегатов и прочая информация, на основе которой формируются маршруты проведения обследований. Эти маршруты загружаются в долговременную память прибора и используются для полуавтоматического сбора данных.

Для проведения измерений в режиме коллектора необходимо зайти в меню «Пройти по маршруту» основного меню коллектора и выбрать маршрут, по которому нужно собрать данные (рис. П.1.14).

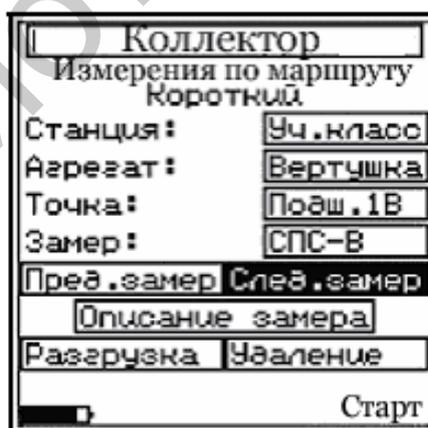


Рис. П.1.14. Окно маршрута

В окне выбранного маршрута имеются следующие поля: «Станция» – список станций в маршруте; «Агрегат» – список агрегатов в станции; «Точка» – список измерительных точек в агрегате; «Замер» – список замеров в измерительной точке; «След. замер» – переход к следующему по порядку замеру; «Пред. замер» – пере-

ход к предыдущему замеру; «Описание замера» – просмотр описания замера, введенного в базе данных при создании маршрута; «Разгрузка» – выполнение разгрузки в ПК данных по замеру, точке, агрегату, станции или по всему маршруту; «Удаление» – удаление всех ранее указанных данных или самого маршрута.

В режиме *просмотра данных* осуществляется просмотр записанных в память данных, полученных в режиме анализатора и коллектора. Просмотр данных режима анализатора может идти через два фильтра: первый отбирает записи по времени выполнения или идентификатору замера, второй – по типу замера. Также предусматривается загрузка данных в ПК и их удаление.

Режим *установок* позволяет задать и сохранить параметры работы: время бездействия до автоматического отключения прибора, время до автоматического отключения подсветки дисплея, текущие дату и время, установки коллектора, списки датчиков, параметры ввода данных и проведения измерений.

Установки ввода данных и проведения измерений включают следующие поля: «Оборотная частота» – выбор единиц измерения при определении частоты вращения валопровода (обороты в минуту или герцы); «Стандартный диапазон» (да/нет) – ограничение измерения общего уровня и прямых спектров стандартными частотными диапазонами; «Величины измерений» (да/нет) – включение возможности изменения представления единиц; «Уровень 0 дБ» – базовый уровень, относительно которого ведется расчет мощностей вибрации в третьоктавном анализе.

В меню установок датчиков описываются датчики различных типов, подключаемые к измерительным входам прибора. Количество датчиков каждого доступного типа – до четырех.

Форма установки датчиков (рис. П.1.15) включает поля: «Тип» – выбор типа датчика (акселерометр, токовые клещи, температуры, давления, проксиметр); «Имя» – название датчика в соответствующем канале; «Питание датчиков» – включение/выключение питания датчиков; «Данные датчиков» – поле описания датчиков различных типов, в котором устанавливаются типы, наименования датчиков и их чувствительность.

Установки	
Подключение датчиков	
Канал А	
Тип:	Акселерометр
Имя:	ДАТЧИК А
Канал Б	
Тип:	Акселерометр
Имя:	ДАТЧИК Б
Питание датчиков <input checked="" type="checkbox"/> Вкл	
Данные датчиков	
	Изм.

Рис. П.1.15. Окно подключения датчиков

Меню *дополнительных функций* включает контроль состояния памяти, ее очистки, калибровки каналов (калибратор КС-20 поставляется дополнительно), контроля заряда батареи, загрузки математического обеспечения, возврата к исходным установкам, проведения специальных измерений (измерений любого типа по одному или двум каналам в автоматическом режиме с заданным интервалом с записью в память).

Библиотека БГУИР

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНЫ ДЕЛЕНИЯ МИКРОСКОПА С ОКУЛЯРОМ-МИКРОМЕТРОМ

Для определения цены деления измерительного микроскопа применяют объект-микрометр (шкалу с ценой деления 0,01 мм).

Схема расположения элементов при определении цены деления измерительного микроскопа приведена на рис. П.2.1.

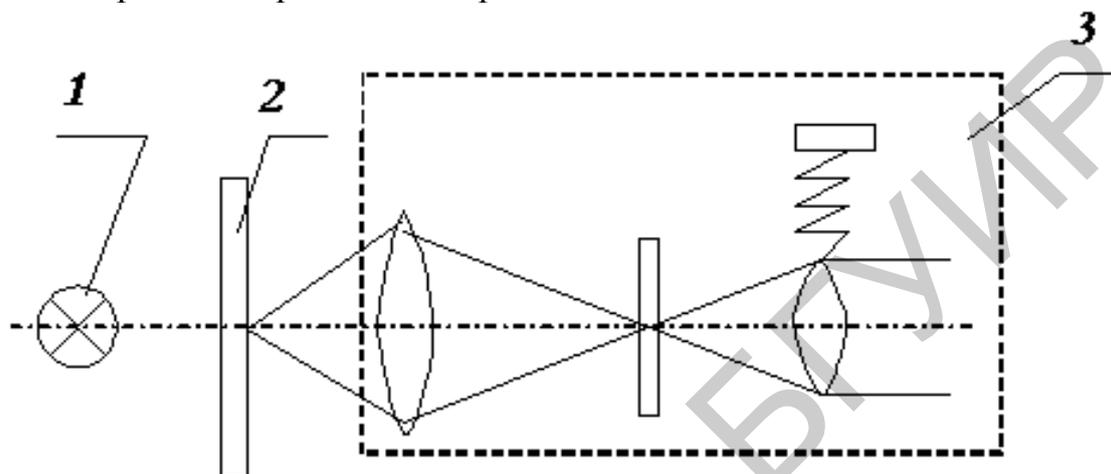


Рис. П.2.1. Определение цены деления измерительного микроскопа:  
1 – источник света; 2 – объект-микрометр; 3 – микроскоп с окулярным микрометром

Последовательность операций:

1. Шкалу (объект-микрометр) освещают рассеянным светом.
2. Микроскоп фокусируют на четкое изображение шкалы.
3. Перекрестие шкалы окулярного микрометра последовательно совмещают с крайними штрихами выбранного интервала шкалы объекта-микрометра (не менее десяти штрихов), вращая барабанчик окулярного микрометра.
4. Снимают отсчеты (не менее 5) по оцифрованной шкале, а затем по барабанчику окулярного микрометра соответствующие совмещению перекрестия окулярного микрометра с крайними штрихами выбранного интервала шкалы объекта-микрометра. Вычисляют среднее арифметическое разности отсчетов  $\Delta N$ .
5. Определяют цену деления измерительного микроскопа по формуле

$$C = \frac{nC_1}{\Delta Nt},$$

где  $C_1$  – цена деления объекта-микрометра;

$n$  – число делений в выбранном интервале шкалы объекта-микрометра;

$t$  – цена деления барабанчика окулярного микрометра (без объектива микроскопа).

Для окуляра-микрометра типа МОВ-1-15  $t = 0,01$  мм (ГОСТ 7865–56).

## ТИПОВЫЕ КОНТРОЛЬНО-ЮСТИРОВОЧНЫЕ ПРИБОРЫ

### П.3.1. Назначение контрольно-юстировочных приборов и особенности визуального контроля

Контрольно-юстировочные приборы применяются для контроля и юстировки оптических систем. Во многих случаях одни и те же приборы служат для решения обеих задач. Например, при помощи диоптрийной трубки юстируют, а также контролируют нуль диоптрий прибора и параллакс прибора со стороны окуляра.

Приборы общего назначения служат для юстировки и контроля свойств, являющихся общими для всех приборов данного вида. Специальные приборы служат для юстировки и контроля свойств, присущих одному какому-либо прибору. Кроме того, они широко применяются в серийном производстве и обычно комплектуются из приборов общего назначения. Для удобства пользования и повышения производительности техпроцесса как контрольно-юстировочные, так и испытываемые изделия устанавливают на специальных подставках, стойках и т. п.

Контрольно-юстировочные приборы большей частью являются оптическими приборами (зрительные трубы, коллиматоры, микроскопы и т. п.).

Точность юстировки зависит от чувствительности контрольно-юстировочных приборов. В свою очередь чувствительность зависит от свойств самих приборов, а в визуальных приборах – от свойств глаза.

Многие определения в процессе юстировки основаны на установке и наблюдении резкого изображения объекта. Нерезкость изображения зависит от остаточных погрешностей (аббераций), допущенных при расчете и сборке контрольных приборов. У контрольно-юстировочных приборов абберации должны быть ничтожно малы.

В области видимых лучей чувствительность глаза очень высокая. При юстировке используется чувствительность глаза к продольной и поперечной наводке. Установка глаза на определенное расстояние при продольной наводке подобна фокусировке приборов и происходит благодаря аккомодационной способности глаза. Глубина резко видимого пространства, выраженная в диоптриях, называется остротой аккомодации. При диаметре зрачка глаза 2 мм численное значение остроты аккомодации равно примерно 0,2 диоптрии.

При нормальной освещенности в процессе юстировки и контроля приборов диаметр зрачка глаза равен 2–3 мм и его разрешающая способность составляет 60". При большем диаметре зрачка разрешающая способность падает, т. к. увеличиваются абберации глаза и изображение ухудшается.

Точность поперечных установок при наблюдении невооруженным глазом зависит от вида шкал и объектов наблюдения. Так, при наведении нити на край солнечного или лунного диска точность установки равна 30–60". При совмеще-

нии концов штрихов шкалы в одну линию (отсчет шкалы по нониусу) чувствительность глаза составляет  $10''$ , т. е. в 6 раз выше.

Линейная точность при расстоянии наилучшего зрения в 250 мм равна  $250 \cdot 10 \cdot 0,000005 = 0,012$  мм. Острота поперечных установок называется нониальной остротой. Она всегда выше разрешающей способности глаза.

Если видимое расстояние между штрихами шкалы  $\geq 1$  мм, то можно оценить положение индекса, лежащего между штрихами, с точностью до 0,1 деления шкалы.

Глаз обладает свойством хорошо различать весьма малые одиночные объекты, например, тонкие черные нити на светлом фоне, светлые штрихи на темном фоне. Это свойство глаза используется при проверке чистоты оптических деталей. Через окуляр прибора на сетке видны точки и царапины, размеры которых составляют несколько микрометров.

Вследствие адаптации глаз плохо чувствует абсолютное изменение освещенности, но он чрезвычайно чувствителен к разности освещенности двух рядом стоящих полей. Чувствительность глаза в этом случае составляет 3 %. На этом свойстве глаза основаны способ проверки качества изображения по миру и фотометрический способ наводки на резкость.

### П.3.2. Зрительные трубки

Для повышения общего увеличения системы применяют *дополнительную зрительную трубку* (рис. П.3.1), представляющую собой телескопическую систему, состоящую из объектива 1, сетки 2 и окуляра 5. Трубки изготавливают с увеличениями от трех до шести.

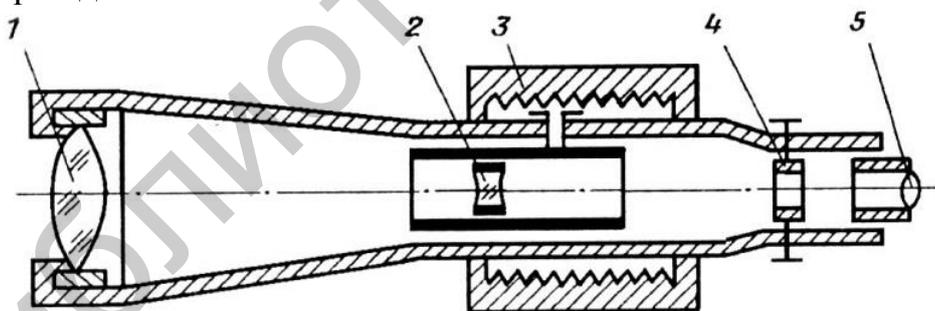


Рис. П.3.1. Дополнительная зрительная трубка

Фокусное расстояние объектива трубки, показанной на рис. П.3.1, равно 88 мм, увеличение  $4^x$ . Сетка 2 расположена в задней фокальной плоскости объектива 1 и обычно имеет перекрестие или штрихи и шкалы в зависимости от назначения трубки. Качество изображения трубок должно быть достаточно высоким. Окуляр трубки имеет диоптрийную наводку для установки на резкость изображения сетки 2 по глазу наблюдателя. Дополнительная трубка удерживается в руках за окуляром проверяемого прибора. При необходимости трубку устанавливают на специальной стойке, которая дает необходимые перемещения трубки.

Диоптрийная трубка (рис. П.3.2) применяется для определения сходимости входящих в нее пучков, диоптрийности систем, правильности установки нулевого деления диоптрийной шкалы окуляра, проверки цены делений шкалы и определения параллакса в диоптриях со стороны окуляра прибора. Фокусировка трубки осуществляется перемещением объектива относительно неподвижного окуляра с сеткой. Перемещением объектива добиваются резкого изображения исследуемого объекта на неподвижной сетке.

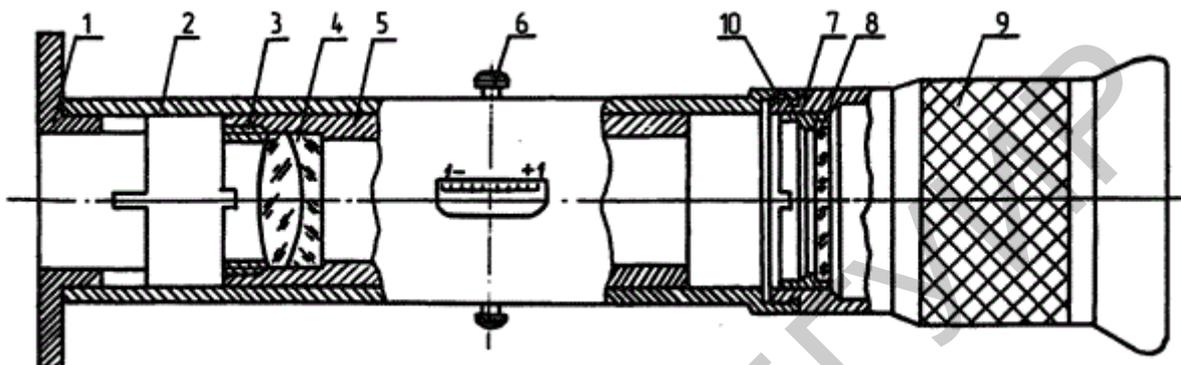


Рис. П.3.2. Диоптрийная трубка

Диоптрийная трубка – это телескопическая система четырехкратного увеличения, состоящая из объектива 4, сетки 8 и окуляра 9 (фокусные расстояния объектива – 80 мм, окуляра – 20 мм, увеличение окуляра –  $12,5^x$ ). Окуляр имеет диоптрийную наводку 7, 10 в пределах  $\pm 5$  диоптрий для установки на резкость изображения сетки по глазу наблюдателя. Корпус окуляра соединен с трубкой 2 переходным кольцом 5. Внутри этой трубки перемещается вдоль оси тубус 5 с закрепленным в нем объективом. Для измерения перемещения объектива в трубке сделано окно со шкалой в диоптриях, а на трубке нанесен индекс. Цена деления шкалы – 0,25 диоптрий, предел измерения составляет  $\pm 2D$  (или  $\pm 2,5D$ ); наименьшее расстояние до предмета, на который может быть сфокусирована трубка, – 500 или 400 мм. При нулевом положении продольной диоптрийной шкалы трубка служит для наблюдения удаленных предметов. Два винта 6 выполняют функции поводков и направляющих для перемещения тубуса объектива.

Расчет шкалы диоптрийной трубки производят по формуле

$$n = \frac{f'^2}{\frac{1000}{N_D} - \Delta + f'}$$

где  $n$  – линейные размеры делений шкалы в миллиметрах при  $N_D$  диоптриях;

$\Delta$  – расстояние в миллиметрах от торца трубки до передней поверхности объектива, когда объектив установлен на нулевой отсчет по шкале диоптрийной трубки;

$f'$  – фокусное расстояние объектива диоптрийной трубки.

Шкала диоптрийной наводки получается неравномерной: плюсовые диоптрийные деления от нуля убывают, а минусовые возрастают. Диоптрийная трубка должна показывать + диоптрий, когда объектив приближается к окуляру, и – диоптрий, когда объектив удаляется от окуляра. Установка дополнительного объектива *1* превращает трубку в микроскоп – *динаметр*, т. е. в прибор, служащий для измерения размеров зрачков выхода и удаления зрачка выхода от наружной поверхности окуляра. Для этого в тубус 5 ввинчивают оправу 8 со вторым объективом. Дополнительная линза превращает телескопическую систему в микроскоп, увеличение объектива микроскопа составляет  $1^x$ , а общее увеличение микроскопа равно увеличению окуляра –  $12,5^x$ .

Для определения размера выходных зрачков сетка трубки имеет шкалу от 0 до 8 мм с ценой делений 0,1 мм (рис. П.3.3). Для проверки удаления выходного зрачка на трубке 2 установлен переходник *1* с эбонитовой насадкой, служащей для упора в проверяемый окуляр. С противоположной стороны диоптрийной шкалы на трубке нанесена дополнительная шкала с делениями от 0 до 70 мм через один миллиметр.

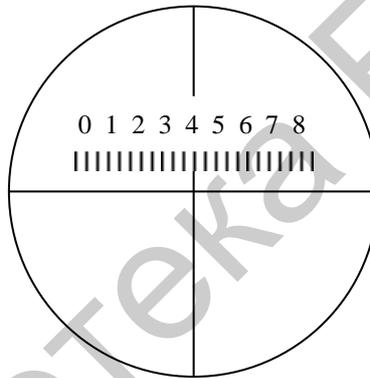


Рис. П.3.3. Сетка диоптрийной трубки (перекрестия – трубка, шкала – динаметр)

### П.3.3. Коллиматоры для проверки разрешающей силы и качества изображения

Для определения предела разрешения и качества изображения приборов применяются коллиматоры, в которых вместо сетки установлена мира – штриховая испытательная таблица, в которой расстояние между штрихами меняется по определенному закону. Качество изображения также часто проверяют по дифракционному изображению светящейся точки, так называемой «искусственной звезды». Для этого в коллиматоре вместо сетки устанавливают станиолевую пластинку, в которой прокалывают небольшое отверстие.

Для получения дифракционного изображения светящейся точки ее диаметр в угловой мере должен быть меньше разрешающей силы объектива коллиматора, т. е. должно быть обеспечено неравенство

$$\frac{d206000}{f_k} \leq \frac{138}{D_k}, \text{ откуда } d \leq \frac{138f_k}{206000D_k},$$

где  $d$  – диаметр отверстия в пластинке;

$f_k$  – фокусное расстояние объектива коллиматора;

$D_k$  – диаметр свободного отверстия объектива коллиматора.

«Искусственная звезда» должна быть ярко освещена; в данном случае ее нельзя освещать рассеянным светом (через матовую пластинку). На отверстие в станиолевой пластинке следует проектировать нить накаливания лампочки, для чего применяют конденсор.

*Широкоугольные коллиматоры* применяются для проверки угла поля зрения приборов, отсчетов и мертвых ходов механизмов при небольших углах визирования, эксцентриситета и цены деления сеток.

На рис. П.3.4 показан широкоугольный коллиматор с объективом «Индустар» И-51. Угол поля зрения объектива  $2\beta = 45^\circ$ , фокусное расстояние объектива равно 210 мм, относительное отверстие 1 : 4,5. Коллиматор состоит из объектива 1, сетки 5 и защитного стекла 6. Плоскость сетки устанавливают в отвесное положение с помощью винтов 7 и уровней 2 и 4, укрепленных на корпусе коллиматора. Сетка коллиматора имеет две шкалы – в градусах с ценой деления  $5'$  и в тысячных дистанции с ценой деления 00–01 (3,6'). Для проверки угла поля зрения прибора в горизонтальном и вертикальном направлениях коллиматор при отвернутом винте 3 поворачивается на  $90^\circ$ , сетка соответственно располагается горизонтально или вертикально.

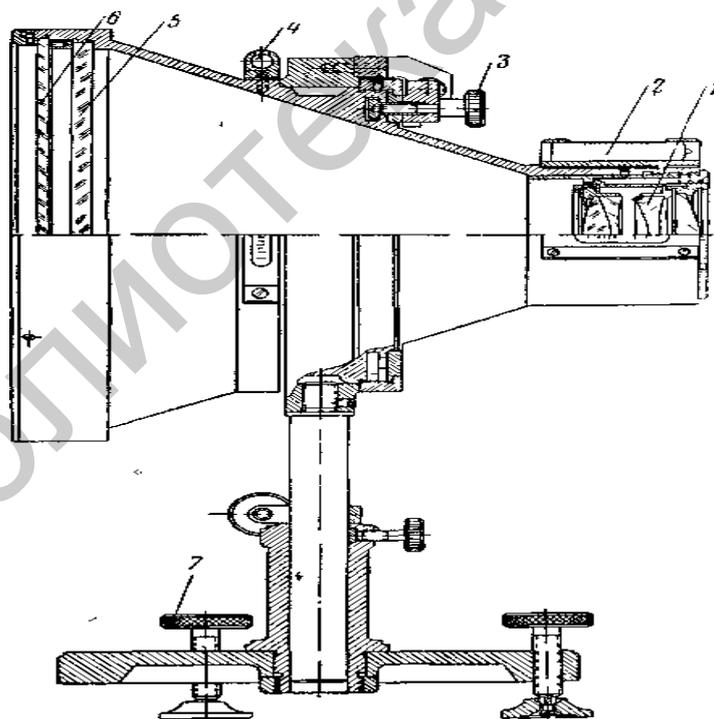


Рис. П.3.4. Широкоугольный коллиматор

*Учебное издание*

**Боженков Владимир Владимирович**  
**Шахлевич Григорий Михайлович**

# **ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Юрец*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 15.05.2018. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,77. Уч.-изд. л. 4,5. Тираж 30 экз. Заказ 358.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.  
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.  
220013, Минск, П. Бровки, 6