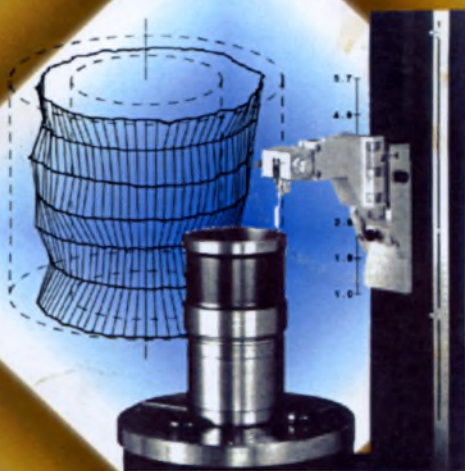


Л. Д. Ковалев
С. Н. Суровой

Специальные приборы для измерения линейных и угловых величин



Минск 2003

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Л. Д. Ковалев
С. Н. Суrowой

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ
И УГЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для студентов специальностей «Приборостроение» и «Метрология, стандартизация и сертификация» высших учебных заведений

Минск 2003

531

УДК 621.002:531.71(075.8)

~~ББК 34.4я7~~

К 56

Рецензенты:

Белорусский государственный институт метрологии,
директор, канд. техн. наук Н.А. Жагора;
кафедра радиоэлектронных средств Белорусского государственного
университета информатики и радиоэлектроники,
зав. кафедрой, профессор Н.С. Образцов

Ковалев Л.Д.

К 56 Специальные приборы для измерения линейных и угловых величин:
Учеб. пособие / Л.Д.Ковалев, С.Н.Суровой. - Мн.: БНТУ, 2003. - 238 с.

ISBN 985-6529-65-4.

В работе изложены методы и средства измерения угловых величин, отклонений формы, расположения и шероховатости поверхности.

Книга является учебным пособием по дисциплинам «Приборы для измерения линейных и угловых величин» и «Средства измерения физических величин». Она может быть использована при прохождении соответствующих разделов специальных курсов на приборостроительном и машиностроительном факультетах.

Книга может быть полезна для конструкторов, технологов и работников технического контроля приборостроительных и машиностроительных предприятий, связанных с конструированием и эксплуатацией контрольно-измерительных приборов и приспособлений.

УДК 621.002:531.71(075.8)

ББК 34.4я7

ISBN 985-6529-65-4

© Ковалев Л.Д., Суровой С.Н., 2003

Введение

Перспективное планирование развития экономики тесно связано со все ускоряющимся повышением требований к качеству продукции.

Влияние качества на непрерывность и ритмичность производства, себестоимость продукции, объем ее выпуска, производительность труда и эффективность в целом ряда процессов производства и потребления многообразно. Высокое качество продукции способствует удовлетворению постоянно растущих потребностей населения, а также стабилизации и развитию международных связей.

Контроль многочисленных параметров качества является в первую очередь задачей измерительной техники. Высокое качество продукции может быть достигнуто только там, где измерительная техника составляет неотъемлемую часть процесса производства. Кроме того, необходимое повышение качества предъявляет все возрастающие требования к эффективности самой измерительной техники. Поэтому обеспечение качества и измерительная техника в процессах производства неразрывно связаны между собой.

В таких отраслях производства, как машиностроение, электротехника, электроника, приборостроение, текстильная промышленность, химическое машиностроение, производство потребительских товаров, измерение геометрических величин является основой проверки контроля качества, учета количества продукции и управления технологическими процессами.

Для получения оптимального качества конкретной детали необходимо нормировать и контролировать:

- отклонение линейных и угловых размеров;
- отклонение расположения поверхностей;
- отклонение формы;
- волнистость поверхности;
- шероховатость поверхности.

В настоящем учебном пособии рассматриваются специальные средства для измерения угловых величин и для измерения отклонений формы и шероховатости поверхности как цилиндрических, так и плоских поверхностей.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические и электрические приборы и аппараты»,

а также для студентов специальности 1-54 01 01 «Метрология, стандартизация и сертификация».

Кроме того, это пособие может быть полезным для студентов всех машиностроительных специальностей.

Учебное пособие подготовлено сотрудниками кафедры «Конструирование и производство приборов» приборостроительного факультета БНТУ и написано в соответствии с программой курса «Приборы для измерения длин и углов».

1. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Оптоэлектронные отсчетные устройства не имеют подвижных частей и лишены тех недостатков механических и электромеханических отсчетных устройств, которые обусловлены перемещающимися массами в виде стрелок, отметок и указателей. В настоящее время оптоэлектронные отсчетные устройства для измерительных приборов, информационно-измерительных систем, систем отображения информации и т. д. получили широкое развитие и отличаются большим разнообразием используемых электрооптических эффектов, а также схемных и конструктивных решений.

1.1. Отсчетные устройства на лампах накаливания и световодах

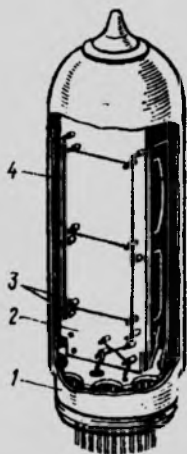


Рис. 1. Цифровая лампа накаливания

Формирование цифровых символов в отсчетных устройствах на лампах накаливания осуществляют следующим образом: сегментное (из отдельных нитей накаливания); матричное (из отдельных ламп накаливания); с помощью трафаретов, где лампы накаливания используют как источники подсветки.

Цифровые сегментные лампы накаливания, основанные на принципе светоизлучения раскаленной спирали, конструктивно выполняют в виде стеклянного вакуумного баллона 1 (рис. 1) с несколькими нитями накаливания – сегментами 4, из которых синтезируются соответствующие цифры.

Нити накаливания изготавливают из специального вольфрамового сплава в виде спирали диаметром 60 мкм. Их крепят между опорными штырями, расположенными на черной изоляционной пластине 2. В зависимости от конструкции лампы свечение нитей и соответствующей цифры можно наблюдать с боковой или торцовой поверхности баллона.

Номинальный режим работы цифровых ламп накаливания соответствует температуре нагрева нитей t не более 1250°C , что обеспечивает большой срок службы при достаточной яркости свечения цифр. При нагреве за счет малых линейных размеров нити не теряют форму прямых, а возможное их провисание глазом оператора не воспринимается. В местах крепления нитей накаливания к штырям температура нитей снижается, в результате чего возникают потемнения спирали, но они мало заметны. Вольфрамовая раскаленная спираль дает соломенно-желтый цвет свечения, и для получения необходимой цветности цифр применяют различные внешние цветные фильтры, устанавливаемые перед торцовой или боковой поверхностью лампы.

Лампы накаливания типа ИВ-19 и ИВ-20 имеют торцовый вывод цифровой информации с увеличенным числом сегментов (10 сегментов на одном знакоместе), что исключает ошибки считывания при отключении одного из сегментов. Лампа ИВ-19 имеет жесткие, а лампа ИВ-20 – мягкие выводы. Расчетный срок службы цифровых ламп не менее 100 тыс. ч, гарантированный срок службы 10 тыс.ч.

Основные достоинства цифровых ламп накаливания: высокая (до 20 тыс. кд/м²) легко регулируемая яркость, что позволяет эксплуатировать цифровые отсчетные устройства на их основе при прямом солнечном освещении; большой угол наблюдения (до 140°); широкие возможности изменения цветности излучения за счет использования разнообразных цветных фильтров и пленок; высокая долговечность при неизменной яркости в течение длительного срока службы; низкая стоимость, обусловленная недефицитностью используемых материалов и отлаженной технологией изготовления; нечувствительность к воздействию радиации и электростатических полей; возможность сопряжения с интегральными схемами для управления зажигания сегментов.

Недостатками цифровых ламп накаливания являются большая потребляемая мощность, выделение тепла, блики на стеклянном

баллоне, малая скорость смены информации (обычно 15...17 цифр в минуту), обусловленная силовой инерцией нитей накаливания.

Матричные отсчетные устройства на лампах накаливания позволяют получать изображение цифр больших размеров, хорошо наблюдаемых при больших расстояниях до плоскости установки матрицы и при высоких уровнях внешней освещенности.

Типовыми являются цифровые указатели УЦ-411 и УЦ-412, у которых 20 ламп накаливания образуют матрицу в виде цифры 8. Конструктивно они выполнены в виде отдельных блоков на одно место и могут быть установлены на щите в горизонтальном ряду вплотную друг к другу, образуя многорядные отсчетные устройства. Для внешних соединений указатели снабжены разъемами типа МРН-22-2.

Для получения необходимой равномерности свечения всех элементов отсчетного устройства в виде матрицы на лампах накаливания рекомендуют учитывать следующие основные факторы: допускаемый техническими условиями разброс светового потока лампы; неравномерность свечения тела накала; отсутствие жестких ограничений на положение тела накала по отношению к ее баллону и месту крепления; зависимость светового потока и равномерности свечения тела накала от питающего напряжения; количество используемых ламп накаливания и их взаимное расположение на приборной доске или панели; линейные размеры и глубину расположения отдельных ламп.

Некоторые из указанных факторов не зависят от конструкции систем отображения информации и определяются характеристиками лампы. Другие требуют специального учета при создании отсчетных устройств, например, светотехнического расчета, стабилизации напряжения питания и его регулирования для каждой лампы, регулирования взаимного расположения ламп и т. д.

Лампы накаливания как источники подсветки используют в оптических проекционных отсчетных устройствах и в устройствах на основе световодных элементов.

Конструктивная особенность отсчетных проекционных устройств заключается в том, что в одном корпусе расположено несколько независимых проекционных систем, каждая из которых может проецировать на экран только одну цифру. Смена цифр на одном знаке обеспечивается соответствующей коммутацией ламп накаливания проекционных систем. Для получения цифр на одном знаке в преде-

лах экрана оптические оси проекционных систем должны пересекаться в центре экрана.

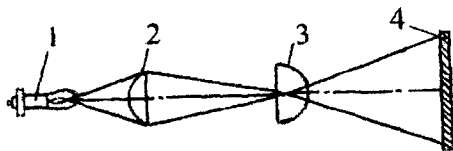


Рис. 2. Оптическая схема одной проекционной системы ячейки ПТ-2М

На рис. 2 показана оптическая схема одной проекционной системы ячейки ПТ-2М, в которой лампа 1 освещает цифру, нанесенную на поверхности конденсора 2, а объектив 3 дает изображение цифры на экране 4. В других устройствах цифры нанесены на сменных диапозитивах или трафаретах.

В цифровых отсчетных устройствах, построенных на основе световодных элементов, цифры, нанесенные на прозрачные пластины, синтезируемые из прозрачных сегментов, становятся видимыми при освещении торцов соответствующих световодов миниатюрными лампами накаливания.

В знаковом индикаторе с торцевой подсветкой цифры от 1 до 9 и запятая нанесены точками на плоские прямолинейные стеклянные пластины, образующие пакет. Торцы пластин подсвечиваются бесцокольными лампами НСМ10Х55ВН, которые обладают высокой надежностью. Разновидности цифрового индикатора на четыре и одиннадцать знакомест отличаются числом пластин и лампочек подсветки, имеют габаритные размеры 63х32х32 мм, размер цифр 32 х 15 мм, мощность на цифру 0,45 Вт, напряжение питания 8,5...9,5В, массу 0,09 кг и могут эксплуатироваться при температуре окружающей среды от - 10 до +65 °С и относительной влажности до 80 %. Обратный контраст цифры и фона при освещенности помещения 30...50 лк не ниже 90 %, допустимый уровень освещенности 200 лк. Для подключения к схеме управления используют штепсельный разъем.

При синтезировании цифр из отдельных прозрачных сегментов в качестве световодов могут быть использованы оптические волокна (рис. 3, а), торцовые части которых, обращенные к оператору, имеют форму сегментов, расположенных в плоскости лицевой панели индикатора. Противоположный торец волокна, имеющий углубление соответствующей формы, вставлен с минимальным зазором в баллон лампы 4, установленной на панели крепления источников излучения 3.

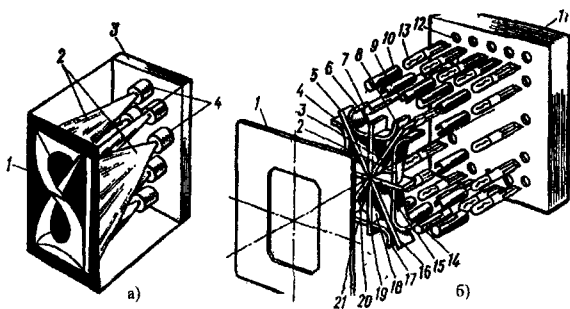


Рис. 3. Отсчетные устройства с торцовой подсветкой

В индикаторе цифровой информации с торцовой подсветкой применены светоизолированные по отношению друг к другу четырехгранные световоды из плексигласа (рис. 3, б). Световоды 2, 4, 7, 14 и 21 расположены по сторонам прямоугольника, разделены сходящимися к центру световодами 6, 15, 18 и 19, а световоды 3, 16 и 20 расположены по диагонали прямоугольника и также сводятся к центру. Все световоды в точках соприкосновения друг с другом светоизолированы и образуют прочную единую структуру в виде неразъемной конструкции. В передней крышке 1 выполнено окно размером высвечиваемой цифры, в плоскости которого расположены выходные торцы световодов. У входного торца каждого световода установлены источники излучения 13, закрытые непрозрачными экранами 10 с щелями 9 по направлению к торцу световодов. Световоды и лампы накаливания с экранами прикреплены к задней стенке 11 из непрозрачного изоляционного материала, в которой выполнены гнезда 12 в соответствии с числом источников излучения. В устройстве использованы лампы накаливания типа КМ 24 x 105, потребляемая мощность не более 16 Вт, размер индикатора 124 x 108 x 60 мм. Управление источниками света и высвечиванием сегментов осуществляется через дешифратор в соответствии с поданным на вход схемы кодом.

В средствах отображения цифровой информации коллективного использования можно применить наборные элементы в виде плоских пластин из флуоресцирующего стекла. Различное сочетание образцов пластин позволяет формировать контур любой цифры от 0 до 9. При облучении боковых поверхностей пластин светом источников в виде ламп накаливания торцы пластин начинают ярко светиться. В устройстве могут быть использованы флуоресцирующие органические

стекла различной толщины и цветовых оттенков, в частности стекла 1ФЖ-6 и 1ФК-6, дающие ярко выраженные желтый и красный цвета соответственно. Оптимальное расстояние наблюдения для индикаторов ЦИФ-1 и ЦИФ-2 составляет 6...8 м при уровне внешней освещенности 300...500 лк, а для индикаторов ЦИФ-3 и ЦИФ-5 соответственно 15...20 м (400...600 лк) и 25...30 м (1500...2000 лк).

1.2. Катодолуминесцентные отсчетные устройства

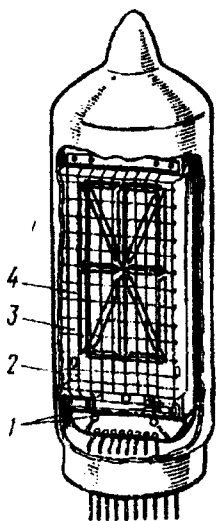


Рис. 4. Катодолуминесцентная цифровая лампа

Принцип действия катодолуминесцентных отсчетных устройств основан на способности люминофоров преобразовывать кинетическую энергию электронов в световую энергию видимого участка оптического диапазона спектра. Катодолуминесцентные устройства представляют собой электровакуумные триоды в стеклянном баллоне, у которых аноды выполнены в виде отдельных элементов (сегментов, отметок), покрытых катодолуминофорами. Подбирая соответствующий состав люминофора, можно получить различный цвет высвечивания.

В *однозарядных катодолуминесцентных цифровых устройствах* (рис. 4) внутри стеклянного баллона последовательно один за другим расположены оксидный катод прямого накала 1, управляющая сетка 2, аноды-сегменты 4, установленные на токопроводящей пластине 3. Подогреваемый катод имеет форму прямой нити накала диаметром около 60 мкм, проходящей вдоль всех сегментов. Для лучшей равномерности свечения при широких цифрах используют две нити накала. Управляющую сетку изготовляют из проволоки толщиной 30 мкм. Она имеет широкие ячейки, и ее устанавливают так, чтобы прикрыть все изображения сегментов-цифр. Каждый электрод (катод, сетка и анод) имеют отдельные выводы, подключаемые к источнику питания, при этом сигналы подаются на аноды через соответствующие коммутирующие устройства. При прохождении тока через нить накала она нагревается до температуры, меньшей температуры каления, и поэтому остается видимой. Сетка и включенные аноды имеют, как правило, положительный потенциал, так что электроны, испускаемые нитью нака-

ла, приобретая некоторую скорость, пролетают по инерции сетку и достигают анода. В каждый момент времени будет светиться тот анод-сегмент, на который подано напряжение, а конфигурация цифры определяется набором светящихся сегментов. Одноразрядные катодолюминесцентные цифровые устройства серийно выпускаются в виде ламп типа ИВ в миниатюрном исполнении нескольких типоразмеров. Все они имеют зеленый цвет свечения. В лампах ИВ-17 и ИВ-22 цифровые символы выводятся через торец баллона, в остальных лампах – через боковую поверхность баллона. При создании цифровых ламп в торцовом исполнении могут быть использованы керамические платы, позволяющие получить более экономичные по величине потребляемой мощности устройства. Плата представляет собой конструкцию, состоящую из керамической подложки размером 26,3 x 15,5 x 1,5 мм с многослойным тонкопленочным покрытием и металлических анодных выводов. Применение тонкопленочных покрытий на платах увеличивает яркость свечения цифр в 1,5...2,0 раза, а также улучшает равномерность свечения сегментов. На основе конструкции унифицированной керамической подложки можно создать различные типы одноразрядных катодолюминесцентных цифровых устройств путем изменения формы и конструкции выводов.

Многоразрядные катодолюминесцентные цифровые устройства могут быть образованы расположением в столбцы и строки (ряды) одноразрядных цифровых устройств, при этом необходимо выполнять большое число самостоятельных выводов. Например, в девятиразрядном устройстве необходимо 99 независимых выводов: 18 выводов от 9 цепей катодов, 9 выводов 9 управляющих сеток, 63 вывода от 9 семи-сегментных цифр, 9 общих выводов.

Более просто и экономически выгоднее выполнять многоразрядные цифровые устройства в виде одной круглой или плоской колбы. Они имеют общие для катодов нити накала, управляющую сетку, состоящую из отдельных самостоятельных частей, расположенных под каждой цифрой, и аноды-сегменты, образующие цифру каждого разряда. Отдельные выводы от каждой сетки позволяют подавать управляющие напряжения на них независимо друг от друга. Одноименные аноды-сегменты цифр различных разрядов соединены между собой и имеют общий вывод. В результате число выводов в девятиразрядном устройстве уменьшается до 19 (2 выхода от общего накала, 9 выводов от 9 отдельных управляющих сеток, 7 выводов от 7 сегментов и 1 общий вывод). Такое число выводов можно конструктивно расположить с одного или двух торцов цилиндрического баллона многоразрядного цифрового устройства.

Многоразрядная лампа типа ИН-18 показана на рис. 5, а, а типа ИН-28А на рис. 5, б.

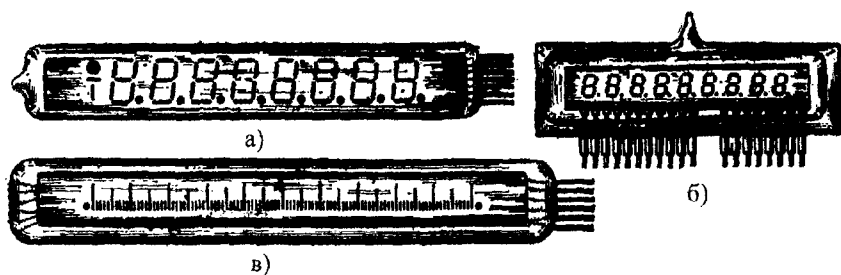


Рис. 5. Многоразрядные катодолюминесцентные отсчетные устройства

Катодолюминесцентные цифровые лампы допускают статический и динамический режимы питания и управления. Поэтому при построении отсчетных устройств и систем с их использованием могут быть применены различные схемы формирования импульсов, управляющих свечением сегментов. Для нахождения оптимального режима управления характеристики цифрового устройства и управляющих электронных схем необходимо рассматривать в комплексе.

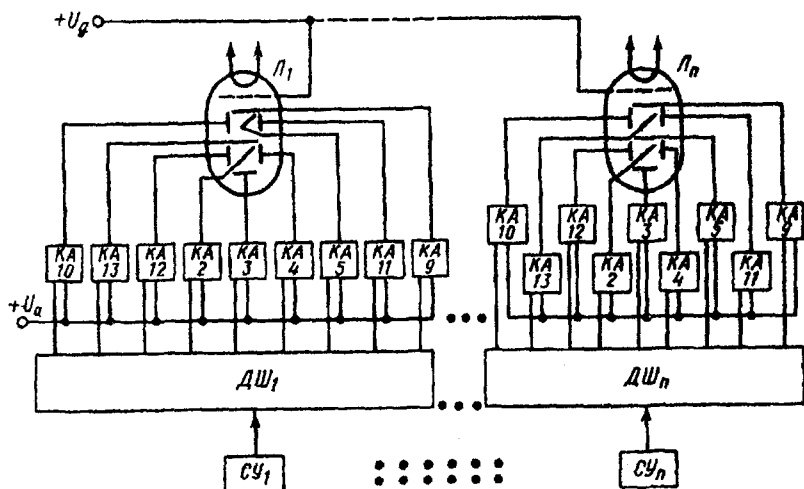


Рис. 6. Схема управления катодолюминесцентных сегментных ламп статическим методом

Статический метод управления характеризуется наличием постоянной информации о высвечиваемых цифрах с непрерывным выводом этой информации в каждом разряде, и его наиболее целесообразно использовать в одноразрядных цифровых отсчетных устройствах. Число в какой-либо форме исчисления с выхода счетного устройства СУ поступает на вход дешифратора ДШ, который преобразует код числа в код индикатора, соответствующего набору сегментов для высвечивания цифры. Информация в коде индикатора с выхода дешифратора подается на соответствующие аноды-сегменты через анодные ключи КА в виде коммутирующего напряжения $+U_a$. Управляющую сетку лампы Л подключают к источнику $+U_d$.

Статический метод управления характеризуется малыми управляющими напряжениями и постоянным потреблением мощности.

При статическом методе управления многоразрядным цифровым устройством управляющие сетки всех ламп подключают к источнику $+U_d$ (рис. 6), при этом число межсхемных проводников соответствует числу выходов цифровых разрядов. Кроме того, для каждого разряда необходим полный комплект элементов управления (дешифраторов, ключей и т. д.), что существенно усложняет электронную схему. В связи с этим для управления многоразрядными цифровыми устройствами целесообразно использовать динамический метод, при котором обеспечивается стробоскопическое питание отдельных ламп и пространственное разделение каналов при выводе цифровой информации заменяется временным разделением. Наиболее распространенным является динамический метод управления с последовательной выборкой знакоместа (с поразрядным опросом) (рис. 7).

Схема управления содержит коммутатор разрядов КР, коммутатор цифр КЦ, дешифратор цифр с формирователями ДШЦ, формирователи сигналов $\Phi C_1 \dots \Phi C_n$ и катодолюминесцентные лампы $L_1 \dots L_n$. Сигнал с первого выхода коммутатора разрядов одновременно с информацией в двоично-десятичном коде поступает на коммутатор цифр и затем на дешифратор, который преобразует двоично-десятичный код в код управления зажиганием сегментов цифровых ламп. Синхронно на управляющую сетку лампы L_1 приходит сигнал с формирователя ΦC_1 , управляемого первым выходом коммутатора КР, и на лампе L_1 высвечивается соответствующая цифра. Так как остальные лампы заперты по управляющим сеткам, то будет светиться только лампа L_1 , хотя сигналы с выходов дешифраторов поступают параллельно на

все лампы L_1, \dots, L_n . При переходе коммутатора разрядов KP в следующее состояние светится лампа L_2 и т. д.

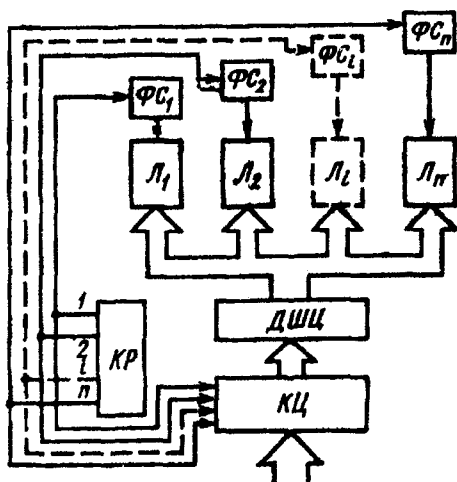


Рис. 7. Схема управления многоразрядных отсчетных устройств динамическим методом

Частота повторения импульсов возбуждения из-за практически безынерционности свечения должна быть не менее 35...50 Гц для исключения заметного мелькания изображения и вследствие этого утомления оператора. Верхняя граница частоты коммутации определяется длительностью переходных процессов в схеме управления и лампах, а также падением яркости изображения, связанным с увеличением числа разрядов.

При использовании динамического метода управления следует принимать во внимание резкие зависимости потребляемого тока и мощности от напряжения анода ламп при постоянной яркости. Яркость свечения возрастает с увеличением анодного напряжения, а при управлении импульсным напряжением средняя яркость изображения прямо пропорциональна максимальной мгновенной яркости и обратно пропорциональна скважности возбуждающих импульсов.

Размеры высвечиваемых цифр в существующих катодолуминесцентных лампах не превышают 18...25 мм, что позволяет применять их в основном в индивидуальных устройствах отображения

цифровой информации или в системах, рассчитанных на удаление оператора от лицевой панели не более чем на 3...6 м.

В катодолюминесцентных отсчетных устройствах с дискретно-аналоговыми шкалами аноды выполняют в виде отдельных полос (отметок) с нанесенными на них люминофорами. Для уменьшения числа выводов из стеклянной колбы аноды могут быть объединены в несколько групп, а управляющая сетка разделена на соответствующее число секций, при этом каждая секция имеет свой вывод. Адресация сигнала управления производится путем подачи потенциала на соответствующую группу анодов и секций сетки.

В зависимости от расположения элементов дискретно-аналогового отсчетного устройства относительно лицевой панели возможны две модификации конструкции. Если аноды расположены на внутренней поверхности стеклянной пластины и выполнены из прозрачного материала, например двуокиси олова, то обеспечивается просмотр изображения отметок «на просвет» со стороны люминофора, противоположной падению пучка электронов.

Аноды удалены от лицевой поверхности, а к ней приближается катод; люминофор работает «на отражение». При работе счетного устройства «на просвет» увеличивается угол наблюдения, так как светоизлучающие анодные сегменты-отметки расположены не на передней плоскости панели, а углублены внутрь колбы. Однако яркость изображения при этом снижается на 30...40 % по сравнению с яркостью при работе «на отражение».

Катодолюминесцентные отсчетные устройства находят широкое применение в микрокалькуляторах, в сетевых и автомобильных электронных часах, в кассовых аппаратах, всевозможных табло, экранах и т. п. В частности, четырнадцатиразрядный цифровой индикатор ИН-27 используется в настольных микрокалькуляторах «Электроника СЗ-22», «Электроника МК-41», «Электроника МК-42». Новые недостатки катодолюминесцентных устройств: одноцветность изображения цифр и отметок шкалы, старение люминофоров, зависимость яркости свечения от длительности эксплуатации.

1.3. Электролюминесцентные отсчетные устройства и экраны

Электролюминесцентные устройства в виде цифровых индикаторов, экранов и шкал основаны на способности кристаллических ве-

ществ (электролюминофоров) светиться при возбуждении электрическим полем.

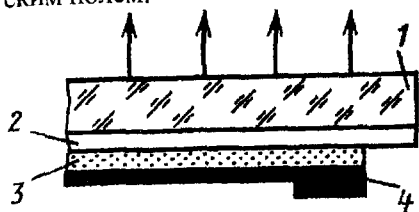


Рис. 8. Конструктивная схема электролюминесцентного устройства

Главным элементом всех электролюминесцентных устройств является плоский конденсатор (рис. 8). На поверхность стеклянной пластинки 1 наносят прозрачный электрод 2, например из оксида олова, электролюминесцентный слой 3 и металлический слой 4. При небольшой толщине электролюминесцентного слоя для увеличения электрической прочности между ним и металлическим электродом часто наносят дополнительный слой двуоксида титана или титаната бария. Форма электродов может быть различной: узкие волоски, образующие одномерную шкалу или двумерную матрицу; фигурные электроды-сегменты, из которых синтезируются цифры; электроды в виде отдельных цельных цифр. Возбуждающее напряжение прикладывается между металлическим электродом и прозрачным проводящим покрытием, свечение наблюдается со стороны стекла.

По виду используемого активного материала различают порошковые и пленочные электролюминесцентные устройства. Порошковые электролюминесцентные устройства с электролюминофорами на основе сульфида цинка или твердого раствора сульфида селенида цинка наиболее известны и широко применяются в устройствах отображения информации. Электролюминофоры этой группы представляют собой мелкокристаллические порошки сульфида цинка с содержанием меди от 0,05 до 0,2 % (по массе). Изменение содержания меди в люминофорах позволяет получить свечение с синим, голубым и зеленым цветом (с промежуточными оттенками). Вместе с медью в сульфид цинка могут вводиться различные добавки, влияющие на цвет свечения, яркость и другие характеристики электролюминофоров. В частности, введение марганца около 1 % позволяет получить электролюминофоры с желтым цветом свечения. Замена сульфида цинка селенидом дает электролюминофоры с оранжевым и красным цветом свечения. При нанесении покрытий с порошковыми электролюминофорами в качестве связующего материала используют диэлектрики на основе лаков ЭП-96 и ВС-530. Применяемые в промышленности методы получения электролюминесцентных порошко-

вых покрытий, из которых наиболее известными и распространенными являются методы пульверизации и литьевой, позволяют получить достаточно однородные, но довольно толстые слои электролюминофора толщиной 20...70 мкм. Это обуславливает необходимость применения высокого рабочего напряжения питания (100...250 В) для получения достаточной яркости свечения.

Пленочные электролюминесцентные устройства отличаются от порошковых способом формирования электролюминесцентного слоя. Вакуумные методы позволяют получить однородные электролюминесцентные пленки толщиной от нескольких десятых до 5...10 мкм. Характерной особенностью пленочных электролюминесцентных устройств по сравнению с порошковыми является наиболее низкое напряжение питания. У различных типов этих устройств оно составляет 10...50 В.

Для возбуждения свечения электролюминофоров используют переменное синусоидальное, постоянное и импульсное напряжение.

Вольт-яркостная характеристика порошковых электролюминесцентных устройств переменного тока (зависимость яркости свечения от напряжения) имеет вид

$$B \approx U^\sigma,$$

при этом коэффициент нелинейности $\sigma = 2...5$.

Зависимость яркости свечения от частоты переменного напряжения определяется в виде

$$B = B_0 f^\eta,$$

где η зависит от типа люминофора. Для частот порядка килогерц $\eta = 1$.

Порошковые электролюминесцентные устройства переменного тока обычно питают от промышленной частоты 50 и 400 Гц от специальных преобразователей частоты 1200 Гц при номинальном напряжении 220 В. По яркостным характеристикам электролюминесцентные устройства с различным цветом свечения разделяют на группы по яркости. Однако для такого устройства существует наиболее эффективный режим питания по частоте и напряжению, обеспечивающий требуемый уровень яркости свечения при минимально потребляемой мощности, что в ряде случаев является важным

при проектировании систем отображения информации. Установлено, что чем выше частота питания, тем ниже начальное значение напряжения, обеспечивающего заданный уровень яркости. Но повышение частоты питания ограничивается допустимой температурой нагрева электролюминесцентных устройств, которая при сохранении уровня яркости свечения возрастает с ростом частоты из-за увеличения мощности потерь. В устройствах с сегментами в виде длинной светящейся полосы повышение частоты питания может дополнительно привести к неравномерному свечению сегмента по его длине вследствие падения напряжения вдоль сегмента.

Порошковые электролюминесцентные устройства, возбуждаемые постоянным электрическим полем, по сравнению с порошковыми ЭЛУ, работающими на переменном напряжении, обладают более высокой яркостью свечения (до 1000 кд/м^2 при напряжении 100 В и толщине слоя 100 мкм), имеют более высокую вольт-яркостную характеристику ($\sigma \approx 7$), лучшую четкость изображения. Кроме того, питание постоянным током позволяет упростить схему коммутации элементов электролюминесцентного устройства. Основным недостатком является чувствительность электролюминофоров к атмосферной влаге, что требует более тщательной герметизации электролюминесцентного устройства.

Отечественная промышленность выпускает электролюминофоры постоянного тока двух типов. Люминофоры первого типа имеют показатель вольт-яркостной характеристики, равный 7, их готовят на основе сульфида цинка, активированного марганцем и медью. При толщине слоя 300 мкм яркость свечения люминофоров $800 \dots 1000 \text{ кд/м}^2$ при напряжении 200 В и плотности тока 20 А/см. Люминофоры второго типа отличаются высокой яркостью свечения при относительно низких напряжениях, но имеют меньшее значение показателя σ . Они синтезированы на основе селенида цинка или твердого раствора сульфида и селенида цинка, активированного марганцем или медью.

Большое практическое значение имеет импульсное возбуждение электролюминесцентных устройств. Такой режим работы характерен для работы многоэлементных устройств, таких, как сегментные цифровые индикаторы, матричные и мозаичные экраны и др. При импульсном возбуждении пленочных электролюминесцентных устройств эффективность электролюминесценции возрастает примерно

вдвое по сравнению со статической. Яркость электролюминесценции в импульсном режиме зависит от скважности следования импульсов, которая, в свою очередь, определяется числом коммутируемых под напряжением элементов электролюминесцентных устройств. Поэтому импульсный режим питания в каждом конкретном случае должен определяться совокупностью двух параметров: длительностью импульса и скважностью.

Пленочные ЭЛУ в импульсном режиме имеют следующие экспериментальные значения основных параметров: напряжение питания 50...100 В; плотность тока 15...30 мкА/мм²; светоотдача 0,2...0,3 лм/Вт; длительность импульса 5...20 мкс; частота следования импульсов 3...10 кГц; яркость после 1000 ч работы 50...180 кд/м²; расчетная яркость после 10000 ч работы 30...80 кд/м².

Электролюминесцентные цифровые отсчетные устройства выполняют в виде отдельных сборочных единиц (рис. 9), в которых стеклянная пластинка 2 со сплошным прозрачным электродом, непрозрачные электроды-сегменты 5, находящийся между ними диэлектрик с распределенными в нем кристаллами электролюминофора, расположены внутри герметизированного корпуса 1. Выводы 4 соединены с соответствующими сегментами, а для крепления корпуса используют крепежные втулки 3. Корпус изготавливают из материала типа АГ-4, обладающего высокой механической прочностью, влагостойкостью и коэффициентом термического расширения, близким к коэффициенту расширения стекла. Качество герметизации, особенно для пленочных конструкций, во многом определяет долговечность работы устройства, так как при проникновении влаги происходят необратимые изменения свойств электролюминофоров, что приводит к резкому спаду яркости свечения или даже полному выходу устройства из строя.

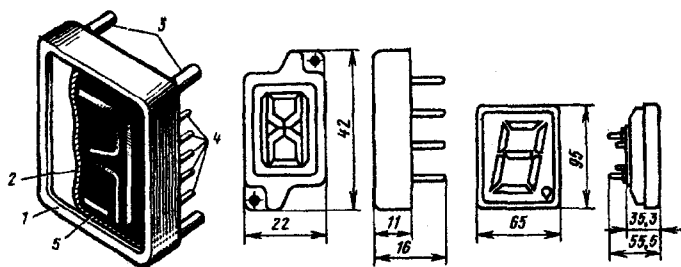


Рис. 9. Электролюминесцентные цифровые модули

Электролюминесцентные цифровые устройства могут выпускаться разных размеров и конструкций. Однако для удобства исполнения и с целью унификации выделены несколько типоразмеров, освоенных в промышленных масштабах. В зависимости от площади информационного поля они условно могут быть разделены на три категории: малые – до 30×30 мм, средние – до 150×150 мм и большие – свыше 150×150 мм. Существующие типовые конструкции входят в первые две категории, а третью категорию обычно составляют узкоспециализированные устройства. Наиболее широкое применение получили устройства среднего размера (IV...XII), некоторые типовые конструкции которых показаны на рис. 9, б, в.

Важной задачей при практическом использовании электролюминесцентных устройств является повышение контраста изображения в условиях нормальной и повышенной освещенности, когда яркость фона значительно возрастает в результате отражения и рассеяния внешнего света. Увеличение контраста может быть достигнуто в результате увеличения яркости свечения, уменьшения полного коэффициента отражения в конструкции самого электролюминесцентного устройства, применения специальных защитных козырьков или щитов, использования цветных светофильтров и др. Первый способ трудно реализуем, так как яркость существующих электролюминофоров при различных условиях возбуждения ограничена их световой отдачей. Уменьшение полного коэффициента отражения с 34 % (серийная конструкция) до 6 % за счет применения специальных материалов, просветляющих пленок и поглощающих слоев позволяет использовать электролюминесцентное устройство с повышенным контрастом в условиях внешней освещенности до 5000...6000 лк. Значительное увеличение яркостного и цветового контраста возможно, если внешний свет пропускать через оранжевые светофильтры, а перед панелью с зеленым цветом свечения установить зеленый фильтр.

Выбор цвета свечения цифр зависит от конкретных условий эксплуатации цифрового отсчетного устройства. В одних случаях необходимо выбрать цвета, обеспечивающие наиболее точное и быстрое считывание цифровой информации, а в другом – выбрать ряд цветов, резко отличающихся друг от друга и обеспечивающих необходимый или требуемый контраст изображения цифр. Оптимальным цветом для высвечивания цифровой информации является желто-зеленый цвет с длинами волн $0,5...0,57$ мкм, характеризующийся максимальной видимостью,

обеспечивающий максимальную скорость и точность считывания и вызывающий наименьшее утомление оператора. Близким к оптимальному по спектральным характеристикам является зеленый цвет свечения электролюминофоров ЭЛ-516 и ЭЛ-510М при возбуждении от источника синусоидального напряжения частотой 400...1200 Гц. В связи с этим цифровые устройства на указанных люминофорах имеют яркость, значительно превосходящую яркость устройств с голубым, желтым и красным свечением цифр, и их наиболее широко применяют в различных электролюминесцентных отсчетных устройствах.

Цифровые устройства, изготовленные на основе электролюминофора ЭЛС-455 с голубым цветом свечения, характеризуются малой насыщенностью цвета, а индикаторы с желтым цветом свечения рекомендуют применять при необходимости выделения определенных цифр на информационном табло. Использование насыщенного синего и красного цветов для отображения цифровых данных нежелательно из-за хроматической аберрации глаза, которая заметно сказывается на краях видимого диапазона оптического спектра.

Целесообразность использования комбинаций электролюминесцентных устройств с различным цветом свечения для кодирования информации может быть оценена путем определения цветовых контрастов по равноконтрастному цветовому графику. Для цветового кодирования минимальный цветовой контраст одновременно рассматриваемых изображений должен составлять не менее 5...7 цветовых порогов. Учитывая, что для цветового кодирования информации обычно применяют 3...4 тона, целесообразно использовать сочетания цветов, обеспечивающих максимальное значение цветового контраста, например, с зеленым, синим и красным (желтым) свечением. При таких сочетаниях цветовой контраст любой пары будет не ниже 15.

Одним из наиболее простых и эффективных способов обеспечения стабильных условий наблюдения информации, постоянства контраста изображения во времени является режим постоянной яркости. Он заключается в выборе таких значений возбуждающего напряжения (при постоянной частоте), которые позволяют поддерживать яркость свечения цифр в течение всего срока эксплуатации на одном и том же уровне. При таком режиме питания в начальный период эксплуатации амплитуду возбуждающего напряжения выбирают ниже номинальной, а затем по мере старения люминофора ее повышают до уровня, не превышающего пробивного напряжения для конкретного типа электролюминесцентного устройства. В результате оно значительную часть времени работает при пониженном напряжении, старение люминофора происходит медленнее, долговечность его увеличивается.

Работа электролюминесцентного устройства в режиме постоянной яркости особенно целесообразна в том случае, когда на одной информационной панели расположено большое число отдельных электролюминесцентных отсчетных устройств, имеющих в общем случае различные эксплуатационные характеристики. Практически одинаковую яркость свечения и равный контраст изображения отдельных отсчетных устройств, расположенных в разных местах информационной панели, обеспечивают индивидуальным или групповым регулированием уровня питающего напряжения. В настоящее время ступенчатое повышение напряжения осуществляют переключением секционированной обмотки выходного трансформатора источника питания по субъективной оценке спада яркости. Однако наилучшая стабилизация уровня яркости электролюминесцентного устройства в процессе эксплуатации может быть достигнута только в случае, когда напряжение повышается с закономерностью, соответствующей характеристике старения электролюминофоров в данных условиях эксплуатации.

Электролюминесцентные экраны относятся к универсальным типам индикаторов и позволяют отображать на одном знакоместе знаки и символы любой формы, в том числе и цифровую информацию.

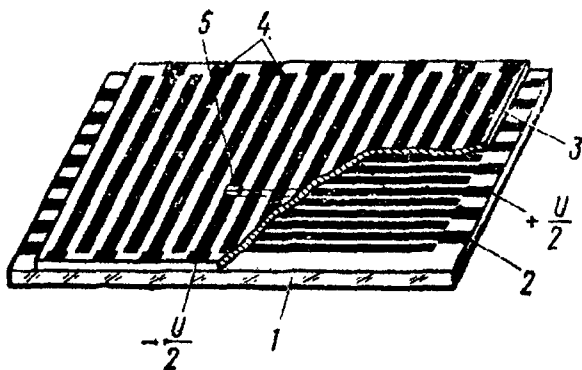


Рис. 10. Конструктивная схема электролюминесцентного экрана

Мозаичные экраны выполняют в виде совокупности расположенных в одной плоскости малогабаритных электролюминесцентных устройств одного или нескольких цветов свечения. Они могут иметь достаточно высокую яркость свечения и контраст изображе-

ния, но громоздкие сложные схемы управления и коммутации существенно ограничивают их практическое применение.

Матричные электролюминесцентные экраны построены по принципу возбуждения светящегося элемента на перпендикулярном пересечении вертикальных и горизонтальных электродов. В простейшем матричном экране (рис. 10) слой электролюминофора 3, нанесенный на стеклянную пластинку 1, расположен между двумя взаимно перпендикулярными системами узких горизонтальных 2 и вертикальных 4 шин-электродов. В местах пересечения электродов образуются миниатюрные электролюминесцентные конденсаторы, составляющие в совокупности растр из элементарных ячеек 5.

Минимальное расстояние между параллельными электродами должно быть больше толщины электролюминесцентного слоя, чтобы электрическое поле между соседними электродами не привело к явлению электролюминесценции в зазорах между ними. Минимальная ширина ограничена условием получения однородного свечения отдельной ячейки и должна намного превышать средний размер зерен электролюминофора. При построении экранов на порошковых электролюминофорах максимальная плотность шин 2 или 3 на 1мм, а при использовании пленочных электролюминофоров плотность может быть значительно увеличена.

Возбуждение свечения необходимой ячейки матричного экрана производится одновременной подачей напряжения на электроды, между которыми она располагается. Так как в матричных экранах изображение высвечивается не одновременно по всему информационному полю, а поэлементно или построчно, то необходимо повышать максимальную яркость свечения электролюминофоров по сравнению с сегментными цифровыми электролюминесцентными устройствами. Для того, чтобы матричные экраны были пригодными для широкого применения в условиях нормального или повышенного внешнего освещения, требуются люминофоры с большой яркостью свечения. В табл. 1 приведены усредненные данные по результатам измерений яркости свечения усовершенствованных промышленных электролюминофоров при различной частоте питающего напряжения 220 В.

Яркостные характеристики усовершенствованных
электролюминофоров

Электролюминофор	Цвет свечения	Яркость, кд/м ² , при частоте, Гц		
		50	400	1000
ЭЛ-525-С	Зеленый	7...10	76...100	140...250
ЭЛС-510-В	Зеленый	9...15	76...125	130...230
ЭЛ-465	Голубой	4...5	30...45	50...80
ЭА-570М	Желтый	7...10	70...110	120...150
ЭЛС-670-И	Красный	0,6...1	8...12	17...30

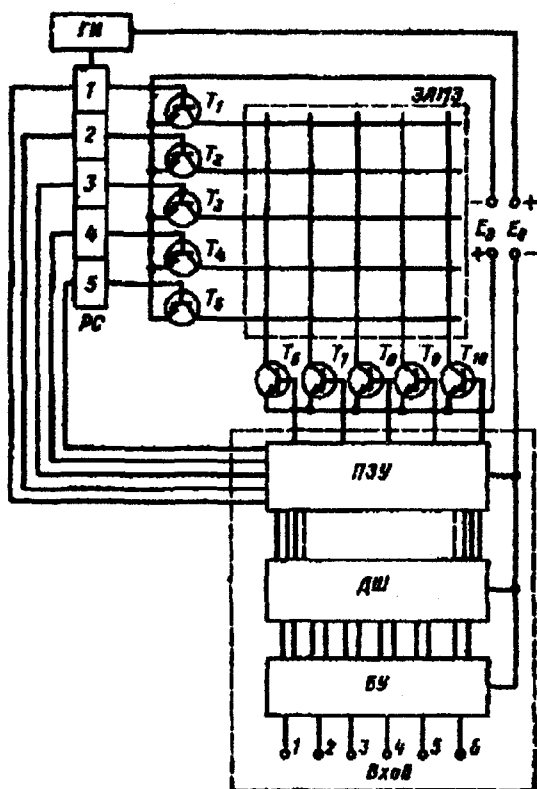


Рис. 11. Схема управления электролюминесцентным матричным экраном

В типовой схеме управления электролюминесцентным матричным экраном (ЭЛМЭ) с построчным режимом возбуждения отдельных ячеек (рис. 11) генератор строчных импульсов ГИ выдает импульсы с периодом T на сдвигающий регистр строк РС, который последовательно и поочередно открывает на время T строчные транзисторы $T_1 \dots T_5$. В результате строки матрицы по одной подключаются к отрицательному полюсу источника питания E_3 . Формирование изображения элементов осуществляется схемой коммутации столбцов. На блоке удвоения БУ имеются шесть шин, каждая из которых может быть в двух состояниях: подключенной к минусу источника E_c или неподключенной к нему. Блок удвоения имеет на выходе 12 шин, соединенных с дешифратором ДШ. Число возможных комбинаций $2^6 = 64$ определяет количество шин на выходе дешифратора, а каждый входной код соответствует подаче напряжения из дешифратора только на одну из 64 шин, соединенных с постоянным запоминающим устройством ПЗУ. Одновременно из регистра строк РС в запоминающее устройство поступает та же серия импульсов, которая используется для управления транзисторами $T_1 \dots T_5$. Запоминающее устройство выдает на транзисторы $T_6 \dots T_{10}$ последовательность отпирающих импульсов длительностью T , соответствующую введенному коду. В результате отдельные элементы панели возбуждаются в заданной последовательности и наблюдается изображение цифр, состоящее из отдельных светящихся элементов.

В работе описан электролюминесцентный модуль матричного типа с числом элементов разложения $35(5 \times 7)$. При разработке модуля использовались люминофоры ЭЛ-570 и ЭЛ-516 при синусоидальном и импульсном режимах возбуждения. Напыление электролюминесцентных слоев проводили на контрастное стекло с коэффициентом пропускания 0,5. Режимы напыления обеспечивали получение равномерных по толщине слоев с пробивным напряжением не менее 400 В. Размеры модуля 38×54 мм.

В макете низковольтного матричного экрана использовали люминесцирующие в постоянном электрическом поле пленки, полученные сублимацией в вакууме Cu_2S и ZnS , легированные Cu , Mn и Cl . Экран имеет 5×5 элементов по $0,45$ мм² каждый. Поле изображения 6×7 мм. При одновременном возбуждении всех элементов экрана импульсным напряжением 25...30 В длительностью 50..10 мкс при скважности,

равной 5, эффективная яркость экрана около 10 кд/м^2 , а средняя потребляемая мощность $20...50 \text{ МВт}$.

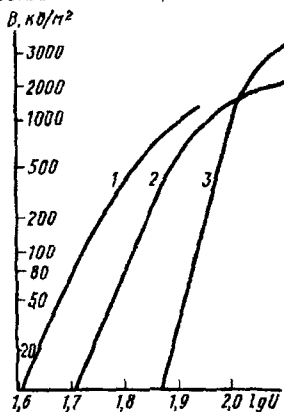


Рис. 12. Вольт-яркостные характеристики пленочных электролюминесцентных излучателей

заменена прослойкой из окиси иттрия Y_2O_3 , толщина которой сравнима с толщиной электролюминесцентной пленки. На рис. 12 приведены вольт-яркостные характеристики трех типов структур с толщиной пленки $\approx 0,5 \text{ мкм}$: 1 – с одним слоем SiO_2 ($0,02 \text{ мкм}$) в качестве диэлектрической прослойки (исходная структура); 2 – с одним слоем Y_2O_3 толщиной $0,2 \text{ мкм}$ ($SnO_2 + ZnS: Mn (Cl) + Y_2O_3 + Al$); 3 – с двумя такими слоями, расположенными по обе стороны от электролюминесцентной пленки ($SnO_2 + Y_2O_3 + ZnS: Mn + Y_2O_3 + Al$). В области высоких яркостей ($100...1000 \text{ кд/м}^2$) степень нелинейности характеристики: для первой структуры – $7...8$, для второй – $9...10$, для третьей – $17...25$. Максимальная яркость для тех же структур равна $1000...1300$, $2000...2500$ и $4000...5000 \text{ кд/м}^2$ соответственно. Для повышения контрастности структур в условиях высокой внешней освещенности перед верхним металлическим электродом помещали слой диэлектрика толщиной около $0,2 \text{ мкм}$. На основе указанных выше структур изготовлены матричные экраны с числом элементов 40×50 , работающие в импульсном режиме возбуждения. Анализ характеристик экрана показывает возможность создания устройств с числом элементов 500×500 .

Электролюминесцентные шкалы находят широкое применение в качестве отсчетных устройств в различных электроизмерительных приборах.

Создание матричных экранов с большим числом коммутирующих элементов при средней яркости 30 кд/м^2 , коэффициенте контрастности $0,5$ в условиях внешней освещенности до 3000 лк возможно на основе высококонтрастных пленочных электролюминесцентных излучателей большой яркости (до 10^4 кд/м^2) и с сильно нелинейной вольт-яркостной характеристикой, $\sigma > 20$. В электролюминесцентной структуре $SnO_2 + ZnS: Mn (Cl) + SiO_2 + Al$ на основе пленок ZnS : марганцевая тонкая диэлектрическая прослойка SiO_2

Вертикальные или горизонтальные шкалы размещают на электролюминесцентных индикаторных панелях (рис. 13). Панель может содержать постоянно светящиеся главные деления шкалы с цифровыми указателями. Рядом с этой шкалой размещен столбик горизонтально расположенных дискретных электролюминесцентных элементов, число которых определяет точность отсчета. Управление элементами осуществляется с помощью схемы коммутации, которая преобразует входной аналоговый сигнал в дискретный. В зависимости от используемой схемы и значения измеряемой величины может изменяться высота светящегося столбика или перемещаться одна светящаяся метка (индекс) при поочередном высвечивании отдельных элементов. Отметки шкал могут быть выполнены из электролюминофоров различного цвета свечения, что удобно при оценке предельных значений измеряемого параметра.

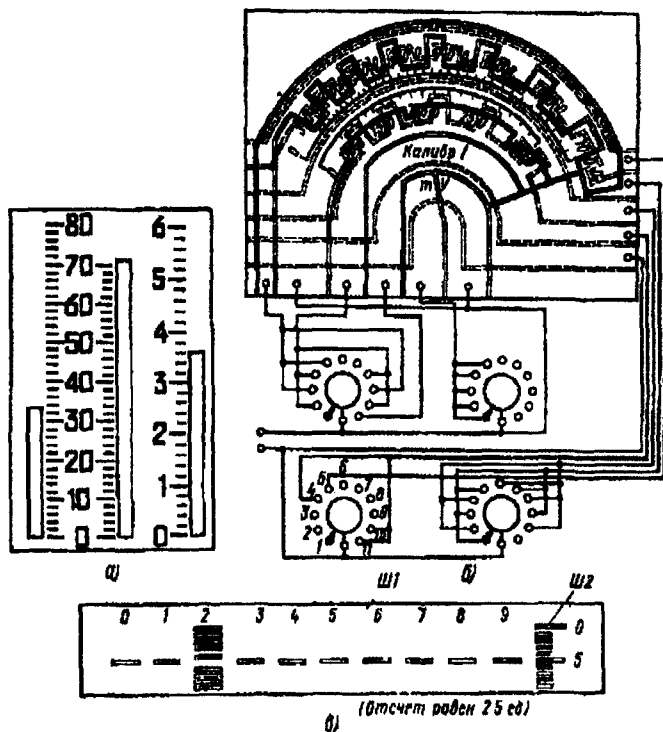


Рис. 13. Электролюминесцентные шкалы

Электролюминесцентные шкалы применяют и в стрелочных электроизмерительных приборах. Их использование особенно эффективно в многопредельных и многошкальных приборах, когда при переключении пределов измерений высвечивается только та шкала и те ее цифровые отметки, которые необходимы для конкретных измерений. Шкалы могут быть изготовлены из электролюминофоров различного цвета. На рис. 13, б, например, конфигурация прозрачного электрода шкалы показана штриховыми линиями, а непрозрачного – сплошными тонкими линиями. Отметки шкал и соответствующие цифры выполнены в виде отверстий в слое диэлектрика, расположенного между электролюминесцентным слоем и непрозрачным электродом.

В милливольтметре Ф5090 и других электроизмерительных приборах используют матричные электролюминесцентные устройства с поразрядным отсчетом и двумя шкалами: десятков Ш1 и единиц Ш2 (рис. 13, в). Рабочая часть матрицы содержит десять строк и десять столбцов, позволяющих сформировать 100 отсчетных элементов (ячеек) и обеспечить погрешность отсчета 1 %. При подаче сигналов, действующих на соответствующие столбцы и строки, формируется изображение в виде светящегося горизонтального «столба» и светящейся риски, дискретно перемещающейся в направлении, перпендикулярном к оси «столба». Длина «столба» пропорциональна единицам входного измеряемого параметра (напряжения), а положение риски определяет десятые доли единиц светящегося «столба». Блок управления вырабатывает напряжения +180, +200, +220 и +240В для питания электролюминесцентной шкалы. Каждое последующее из четырех напряжений подключается по мере уменьшения яркости свечения ячеек шкалы во время ее эксплуатации, что обеспечивает работу шкалы в режиме постоянной яркости.

1.4. Отсчетные устройства и матрицы на светоизлучающих диодах

Физической основой для конструирования современных полупроводниковых отсчетных устройств на светоизлучающих диодах с высокими энергетическими и световыми параметрами является излучательная рекомбинация экситонов, электронов и дырок в объеме «активной области» $p-n$ -структуры при инжекции неосновных носите-

лей заряда через гомогенный или гетерогенный p - n -переход под действием напряжения, приложенного в прямом направлении.

Светодиоды для видимого излучения изготавливают главным образом из монокристаллов материалов типа $A^{III}B^V$ фосфида галлия (GaP), арсенида галлия (GaAs) и более сложных соединений $GaAs_{1-x}P_x$ (арсенида-фосфида галлия), $Ga_{1-x}Al_xAs$ (галлия-алюминия-арсенида), где x — доля содержания того или иного элемента в соединении.

Для индикаторов красного цвета свечения отечественная промышленность выпускает два основных типа структур: $GaAs_{0,6}P_{0,4}$ (на подложках GaAs) n^+-n -типа и $Ga_{0,65}Al_{0,35}As$ (на подложках GaAs) $p^+-p_1-p_2-n$ -типа. Первая структура характеризуется высокой эффективностью, отработанной технологией изготовления и в настоящее время является основным материалом для массового производства всех имеющихся разновидностей цифровых и дискретно-аналоговых отсчетных устройств. Вторая структура обладает в 4...6 раз большим квантовым выходом, но из-за высокой активности алюминия она получается только методом жидкостной эпитаксии, что не обеспечивает достаточно высокую степень однородности параметров по поверхности и обуславливает высокую стоимость изготовления. На основе структуры $GaAs_{1-x}P_x$ разработаны и освоены, в частности, цифровые устройства красного цвета свечения АЛС313А и АЛС323А, широко применяемые в электронных наручных часах, многоразрядные цифровые устройства типа АЛС318, используемые в многоразрядных микрокалькуляторах.

Для цифровых устройств желтого цвета свечения применяют следующие типы: GaP (на подложке GaP) n^+-n-p -типа, легированная N и Zn + O; $GaAs_{0,15}P_{0,85}$ (на подложке GaP) n^+-n -типа; $In_{0,1}Ga_{0,7}P$ (на подложке GaP) n^+-n -типа, которая обладает в 1,5...2 раза большим квантовым выходом по сравнению со структурой $GaAs_{0,15}P_{0,85}$ и считается перспективной для промышленного использования. Кроме указанных материалов для получения изображения цифр желтого цвета используют карбид кремния SiC, на основе которого разработаны одноразрядные цифровые светодиоды типов КЛ104А, КЛ105 и КЛ114 и существует небольшая серия плоских цифровых устройств типа ЭЛЦИЖ, имеющих семь сегментов в разряде. Обозначение 05 соответствует климатическому исполнению и категории жесткости.

Для цифровых устройств зеленого цвета свечения практически единственным материалом, имеющим промышленное использование, является структура GaP (на подложке GaP) $n^+ - n - p$ -типа.

Конструкции цифровых устройств на светодиодах и их отдельных элементов разрабатываются на основе параметрического ряда по высоте знака для полупроводниковых знаковых индикаторов, при этом остальные размеры, например форма и ширина цифры, являются производными параметрами. Заданные размеры и конфигурация светящихся элементов, их число и взаимное расположение, размеры поля изображения обеспечиваются либо определенной топологией светящихся элементов монокристаллического полупроводникового кристалла (монокристаллическая конструкция), либо определенным размещением одноэлементных или многоэлементных кристаллов на основании и других деталях корпуса (гибридная конструкция).

Монокристаллические конструкции цифровых отсчетных устройств на светодиодах с высотой знака до 5 мм являются наиболее массовыми. Их основные области применения: карманные микрокалькуляторы, электронные наручные часы, электронные секундомеры и другие портативные отсчетные устройства с автономным питанием.

Для изготовления кристаллов всех типов монокристаллических конструкций разработана базовая планарная технология, позволяющая с помощью локальной диффузии акцепторов (цинка) в эпитаксиальные структуры формировать излучатели любой формы и размеров, в частности, сегменты цифровых отсчетных устройств, расположенные в линию отметки и т. д.

При проектировании кристалла цифрового устройства (рис. 14) длина сегмента определяется требованиями к высоте цифры, а ширина сегмента может изменяться в пределах от 80 до 120 мкм в зависимости от размера кристалла.

Планарные контакты к излучающим элементам монокристаллического кристалла имеют гребенчатую структуру. Контактные площадки вынесены за $p-n$ -переход и располагаются на диэлектрике над материалом n -типа. Планарные конструкции на светодиодах отличаются высокой надежностью, однородностью свечения элементов, возможностью создания большого числа светящихся элементов любой конфигурации с любыми размерами, четко очерченной выбранной конфигурации цифр. Однако относительно большой расход полупроводниковых материалов при малой плотности элементов изображения ограничивает возможность получения монокристаллических кристаллов с большой высотой цифр. Типовые размеры рабочего кристалла светодиода $0,34 \times 0,34$ до

0,5 × 0,5 мм, а максимальный размер кристалла монолитного цифрового индикатора не превышает 3 × 2 мм².

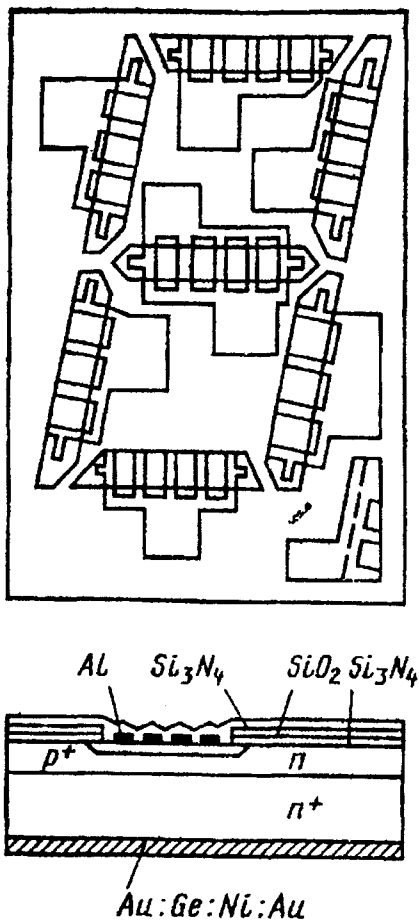


Рис. 14. Кристалл цифрового светодиода

Монолитные цифровые устройства на светодиодах конструктивно изготавливают в бескорпусном исполнении или в герметичном корпусе. Бескорпусные монолитные кристаллы предназначены в основном для использования в гибридных конструкциях отсчетных устройств, и наиболее широко их применяют в производстве элект-

тронных часов. Их монтаж осуществляют с помощью стандартных операций электронной техники. Разработанные бескорпусные монолитные отсчетные устройства достаточно разнообразны: от простейших 7-сегментных (АЛС313А-5) и 9-сегментных (АЛС322-5 и АЛС323А-5) цифровых индикаторов до 100-элементных дискретно-аналоговых отсчетных устройств. Для одноразрядных и многоразрядных монолитных отсчетных устройств на светодиодах с высотой знака 2,5-5 мм наибольшее распространение получили следующие конструкторско-технологические схемы герметичных корпусов.

Полюе керамические корпуса со стеклянной крышкой (рис. 15, а). Такая конструкция в наибольшей степени удовлетворяет требованиям механического и климатического воздействия, и она использована, в частности, в многоразрядном цифровом устройстве АЛС339.

Выводы расположены на нижнем основании корпуса в два ряда с расстоянием 2,5 мм между выводами и между рядами выводов, что сокращает объем монтажного пространства и позволяет применять групповые методы пайки на печатные платы.

Рамочная конструкция с металлической рамкой и прозрачной пластмассовой линзой, формируемой в процессе герметизации корпуса (рис. 15, б) (АЛС311, АЛС328, АЛС329, АЛС330). В многоразрядных цифровых устройствах линза формируется над каждым кристаллом. Шаг между цифрами разрядов 2,75 мм (АЛС311, АЛС328, АЛС329) и 5 мм (АЛС330). Выводы отогнуты вниз и образуют два ряда с шагом 2,5 мм между выводами и 7,5 мм между рядами выводов, что допускает монтаж конструкций в стандартные контактные размеры или в печатные платы с использованием групповых методов пайки. Рамочная конструкция обеспечивает хорошую защиту от воздействия механических и климатических факторов и позволяет набирать отдельные ячейки в строку с сохранением шага между цифрами разрядов.

Жесткое керамическое или стеклотекстолитовое основание и моноблочная линза, механически закрепленная на основании (рис. 15, в). Такой корпус имеет цифровой индикатор АЛС318, выполненный в виде сборки на общей плате девяти кристаллов с шагом 5 мм. Линзовая крышка крепится так, что над каждым кристаллом располагается соответствующая линза. Контактные площадки с металлизированными отверстиями размещены на нижней стороне платы с шагом 2,5 мм, что позволяет монтировать конструкцию групповой пайкой или с помощью разъема.

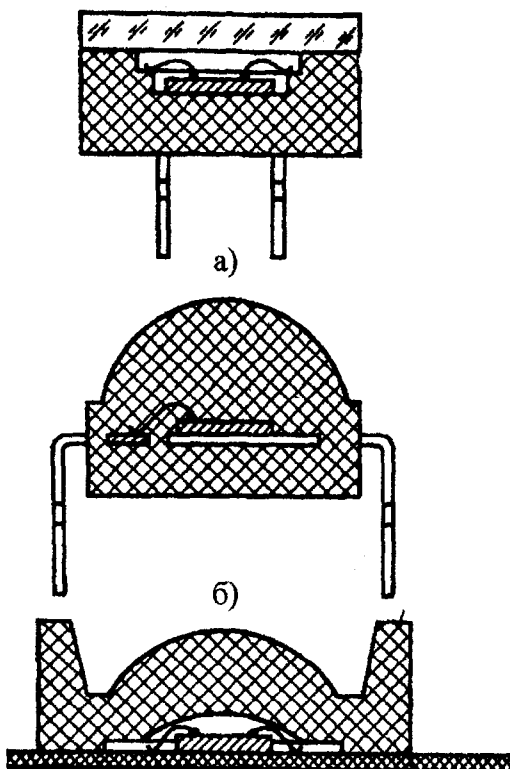


Рис. 15. Корпуса монолитных цифровых устройств на светодиоде

Для герметизации корпусов моноблочных устройств на светодиодах применяют полимерные материалы. В полых керамических корпусах стеклянные крышки приклеивают клеем марки КП с температурой плавления 120°C и прочностью клеевого шва при температуре 20°C не менее 500 Н/см^2 . Герметизацию рамочной конструкции с образованием пластмассовой линзы проводят оптически прозрачным компаундом типа ОП-3М, который имеет коэффициент преломления 1,48 и полимеризуется в форме в течение 2 ч при температуре 125°C .

Сила света в бескорпусных цифровых устройствах и в корпусах без линз практически точно соответствует силе света кристалла. Из кристалла плоской конструкции выходят только те лучи, которые с нормалью к поверхности кристалла образуют угол $\theta \leq \arcsin (N_1 / N_2)$, где N_2 — показатель преломления материала кристалла; N_1 — показатель

преломления окружающей среды. Остальные лучи не выходят из кристалла из-за полного внутреннего отражения на границе раздела кристалл – среда. Для фосфида галлия и арсенида галлия в воздухе световое излучение выходит в виде конуса с углом при вершине не более 35°C .

Использование в конструкции цифровых устройств линзовых элементов изменяет силу света и диаграмму направленности выходящего излучения и увеличивает размер изображения цифры. Форму полимерной линзы выбирают из условия, чтобы излучающий кристалл располагался между фокусом преломляющей поверхности, образованной полусферической линзой, и центром кривизны линзы.

При использовании рамочной конструкции с пластмассовыми линзами (рис. 15, б) кристалл оказывается погруженным в материал линзы, имеющей показатель преломления, промежуточный между воздухом и кристаллом. При этом в зависимости от размеров линзы увеличение линейного размера цифры составляет $1,3\dots 1,7$, увеличение силы света $1,7\dots 2,5$, угол наблюдения $\pm 20^\circ$. При использовании внешних моноблочных линз (рис. 15, а) возможно улучшение характеристик линз и конструирования отсчетных устройств с лучшими характеристиками: увеличением линейного размера цифр $2\dots 2,5$, силы света $3\dots 5$ раз.

Бескорпусные и моноблочные одноразрядные отсчетные устройства на светодиодах имеют как минимум 9 выводов: один от общего катода и 8 от анодов-сегментов и десятичной точки. Такая схема выводов допускает работы как в статическом, так и в динамическом режимах управления. Для управления одноразрядными цифровыми устройствами на светодиодах в статическом режиме предназначена схема управления К514ИД-1. Все типы многоразрядных отсчетных устройств собраны по матричной схеме, допускающей работу только в динамическом режиме: общие катоды каждого кристалла имеют отдельные выводы, а аноды одноименных элементов различных кристаллов присоединены к общей шине. Общее число выводов равно $N_p + 8$, где N_p - число катодных выводов по числу кристаллов (разрядов), а число 8 соответствует анодным выводам семи сегментов и десятичной точке. Специальные схемы для управления многоразрядными цифровыми устройствами на светодиодах в динамическом режиме не выпускаются, так как они входят в состав кристалла БИС приборов, в которых такие устройства используются (электронные часы, секундомеры, микрокалькуляторы, мультиметры и т. д.). В то же время возможно построение схемы управления

для динамического режима работы на основе стандартных интегральных микросхем, которая принципиально не будет отличаться от рассмотренной ранее схемы применительно к многоразрядным катодолюминесцентным отсчетным устройствам.

Гибридные конструкции отсчетных устройств на светодиодах широко используют для отображения цифровой информации при высоте цифр более 5 мм. По способу формирования сегментов они разделяются на две группы.

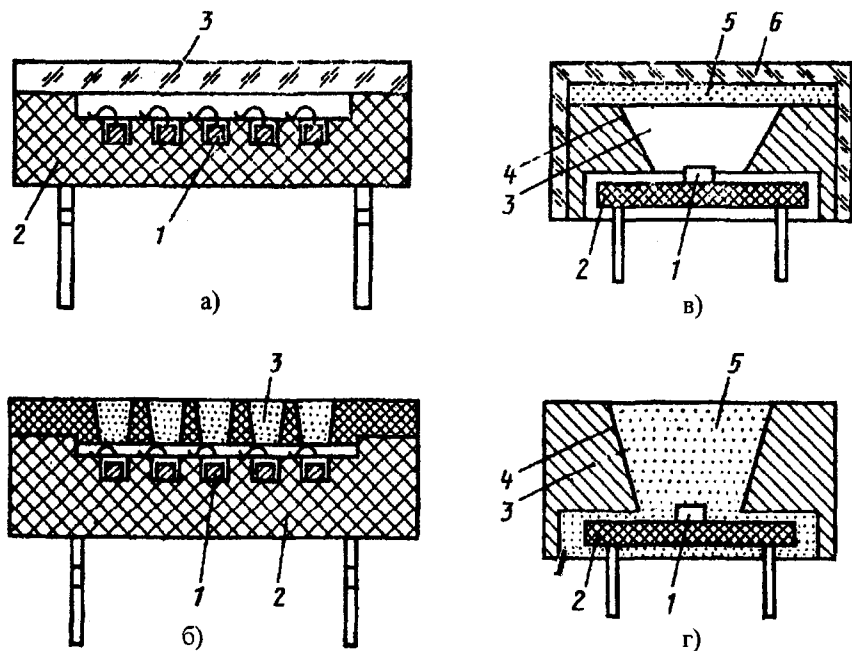


Рис. 16. Гибридные конструкции цифровых устройств на светодиодах

К первой группе относят простую гибридную конструкцию с набором одноэлементных кристаллов 1 (рис. 16, а), расположенных на основании-держателе 2, который может быть помещен в полый герметичный корпус с окном или залит оптически прозрачной пластмассой 3. Особенность такой конструкции заключается в том, что размеры светящихся сегментов, их взаимное расположение, размеры и конфигурация цифр однозначно определяются соответствующими размера-

ми и расположением кристаллов-излучателей. На основе такой конструкции выполнены цифровые индикаторы АЛ304 и АЛ305. Основные недостатки конструкции: большой расход полупроводниковых материалов при больших размерах цифр (АЛ305) и большая трудоемкость сборки с малыми размерами поля изображения (АЛ304).

Вторую, наиболее распространенную группу гибридных конструкций составляют отсчетные устройства, работающие по принципу рассеяния света. В таких конструкциях полупроводниковые кристаллы-излучатели с малыми размерами (около $0,4 \times 0,4$ мм) помещают в светорассеивающие полости световода. Оптическое преобразование изображения точечного источника света – кристалла в изображение светящегося сегмента осуществляется в результате многократного рассеяния света внутри каждой из полостей, оптически изолированных друг от друга. Размеры и конфигурация сегментов и цифр определяются размерами и конфигурацией световодов. В устройствах, работающих по принципу рассеяния света, существенно снижается расход полупроводниковых материалов, они имеют хорошие эргономические характеристики и являются основой для цифровых индикаторов с высотой цифр более 7 мм и модулей экранов.

Основные конструктивные схемы гибридных устройств, работающих по принципу рассеяния света, показаны на рис. 16, б, в, г. Кристалл 1 закреплен на держателе 2. Излучаемый кристаллом свет многократно отражается зеркальными поверхностями 3 пустотелого конуса 4 (рис. 16, в), попадает в светорассеивающую пленку 5, многократно в ней рассеивается и выходит наружу через прозрачную крышку-корпус 6. Равномерность свечения сегмента определяется способом изготовления рассеивающей пленки. Она может быть выполнена в виде плоской рассеивающей или прозрачной с рельефной поверхности пластмассовой пластинки. На основе такой конструкции выполнен цифровой индикатор АЛС309. Для получения высокого коэффициента отражения на стенки корпуса наносят высокоотражающее металлическое покрытие или применяют белые пластмассовые отражатели с коэффициентом отражения $0,9 \dots 0,95$ в широкой области видимого диапазона спектра.

В конструкции, показанной на рис. 16, г, держатель 2 с кристаллом 1 расположен внутри светорассеивающего материала 5, который заполняет корпус 3 с зеркальными отражающими поверхностями 4. В такой конструкции возможно возникновение больших механических

напряжений, обусловленных несогласованностью коэффициентов теплового расширения кристаллов, светорассеивающего материала и других элементов конструкции. Однако благодаря высокой светоотдаче и большой устойчивости к механическим и климатическим воздействиям такая конструкция получила наибольшее распространение (цифровые индикаторы АЛС321, АЛС324, АЛС326, АЛС328, АЛС332, АЛС333, АЛС334, АЛС335 и др.).

При использовании принципа рассеяния света разработан ряд гибридных цифровых индикаторов с высотой цифр 7, 12 и 18 мм, внешний вид которых показан на рис. 17, а, б, в, г.

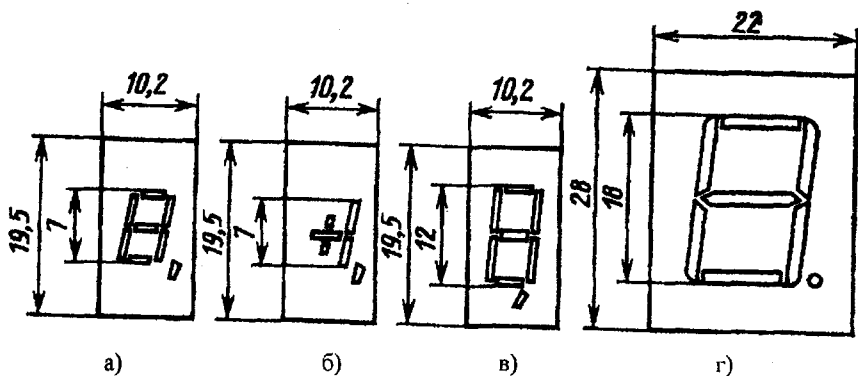


Рис. 17. Внешний вид и основные размеры гибридных цифровых устройств на светодиодах

Значительное увеличение объема передаваемой количественной и качественной информации в цифровой и дискретно-аналоговой форме обеспечивает применение светодиодов с регулируемым цветом свечения за счет изменения режима питания. В частности, такие светодиоды могут быть использованы в отсчетных устройствах, определяющих поле допуска измеряемой или контролируемой величины. При существовании нескольких принципиальных путей создания светоизлучающих диодов с управляемым цветом свечения наибольший практический интерес представляет двухпереходный однокристалльный GaP светодиод типа АЛС331А. Кристалл диода (рис. 18,а) содержит два р-п-перехода с обеих сторон n-подложки GaP. Переход, легированный Zn O, дает красный цвет свечения, а зеленое свечение

имеет переход с примесью N. При включении обоих p-n-переходов благодаря прозрачности фосфида галлия обеспечивается хорошее смещение красного и зеленого излучений с получением промежуточных цветов. Размер кристалла в плане составляет $0,5 \times 0,5$ мм. Плотность тока через p-n-переход с зеленым свечением ~ 8 А/см², через p-n-переход с красным свечением $\sim 11,5$ А/см². Конструкция светодиода (рис. 18, б) выполнена на основе металлокерамической ножки-держателя 3 с отражающей свет конической поверхностью 4, что позволяет использовать боковое излучение кристалла 2 и увеличить силу света в 2...3 раза. Отношение высоты G полимерной линзы 1 к радиусу сферы $G/R \approx 1,7$, что обеспечивает угол обзора $\sim 35^\circ$. Конструкция цифрового устройства на основе светодиода АЛС331А представляет собой гибридный вариант с 8 излучающими элементами. Размер цифры $9 \times 5,4$ мм при общих размерах устройства $21,5 \times 9$ мм. Керамический держатель с 18 выводами позволяет осуществить сборку кристаллов с двумя p-n-переходами, работающими независимо друг от друга. Пластмассовый корпус крепится на держателе светорассеивающим компаундом.

Одна из возможных схем управления светодиодами с регулируемым цветом свечения показана на рис. 18, в. Входная величина x преобразуется аналого-цифровым преобразователем АЦП в цифровой код, который поступает на дешифратор ДШ. Он формирует сигналы, обеспечивающие включение светодиодов в соответствии с изменением величины x . Одновременно блок сравнения БС анализирует кодированное значение величины x , сравнивая его с заданными величинами, поступающими с блока установок БУ, и формирует командный сигнал. Этот сигнал запускает один из генераторов Г, которые отрегулированы так, что генерируют импульсы тока, различные по амплитуде и скважности. Импульсы с выхода возбужденного генератора через логический элемент ИЛИ поступают в цепь питания светодиода. Если величина x находится в пределах допуска, то запускается генератор, вырабатывающий импульсы короткой длительности при значительной амплитуде тока в импульсе, и светодиод имеет зеленый цвет свечения. Если же величина x выходит за пределы допуска, то блок возбуждает другой генератор, который вырабатывает импульсы большой длительности, но с меньшей амплитудой тока, и светодиод дает красный цвет свечения.

Изменяя число генераторов и число установок в блоке сравнения, можно получить несколько цветов свечения отсчетного устройства.

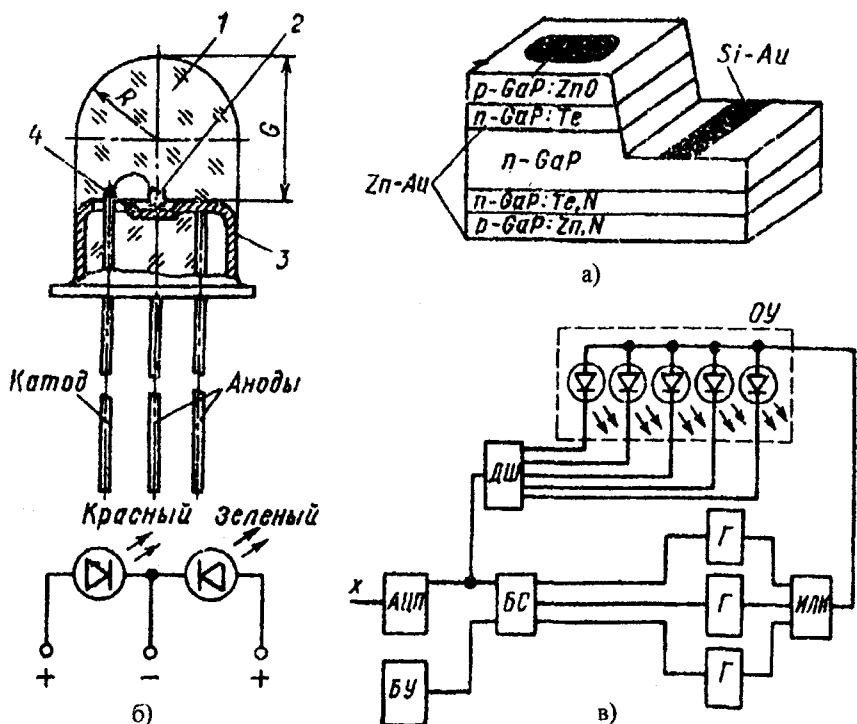


Рис. 18. Светодиод с управляемым цветом свечения

Матричные отсчетные устройства на светодиодах могут изготавливаться из набора отдельных светодиодов или иметь монолитную конструкцию. В первом случае полупроводниковые кристаллы размером $0,3 \times 0,3$ или $0,5 \times 0,5$ мм монтируют (наклеивают) в ряды на плате с предварительно металлизированными полосками, осуществляющими электрическое соединение кристаллов по их нижнему электрическому контакту, а для электрического соединения кристаллов в столбцы по их верхнему контакту разводят золотую проволоку в направлении, перпендикулярном рядам.

Отечественная промышленность выпускает несколько видов матриц на светодиодах. Матрица типа «Модуль-1» включает $5 \times 7 = 35$

отдельных светодиодов квадратного вида со стороной 1 мм. Конструкция позволяет располагать матрицы в ряд для образования многозарядного числа или набора чисел на экране. Матрица типа «Модуль-2» конструктивно выполнена в виде набора из пяти отдельных прямоугольных пластин, размером 1×3 мм, что позволяет создавать дискретно-аналоговые отсчетные устройства со шкалой произвольной длины с числом элементов, кратным пяти. Матричный светодиод типа АЛ306 имеет 36 отдельных кристаллов, из которых 35 служат для образования цифр (5×7), а один для высвечивания десятичной запятой. Светодиод серийно выпускается в модификациях с красным свечением (на GaAsP) и с зеленым цветом (на GaP), что позволяет высвечивать цифры разных цветов в многозарядных отсчетных устройствах.

Большой практический интерес представляют модули экранов с набором светоизлучающих диодов, вмонтированных в специальных корпусах, с помощью которых можно получить сборные матрицы больших размеров без нарушения шага между светящимися элементами в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для модулей экранов приняты следующие шаги между светящимися элементами: 0,625; 1,25; 2,5 мм. Основная трудность при создании корпусов модулей — уменьшение числа выводов при сохранении стандартного шага между ними 2,5 мм и при максимальном числе светоизлучающих элементов. Типовая конструкция включает матрицу светоизлучающих диодов 8×8 и матрицу выводов 4×4 в многослойном керамическом корпусе. Максимальное расстояние от края корпуса до центра любого крайнего вывода 1,25 мм, что позволяет собирать модули в матричный экран без нарушения шага между выводами в 2,5 мм. Расстояние от края конца модуля до центра любого крайнего светящегося элемента модуля 0,625 мм не нарушает шаг экрана 1,25 мм.

В конструкции применена светопроводящая крышка с сеткой конических отверстий, металлизированных изнутри, что обеспечивает эффективную оптическую изоляцию отдельных элементов.

Использование всех типов рассмотренных отсчетных устройств на светодиодах, обладающих узким спектром излучения, позволяет при одной и той же силе света существенно увеличить контраст изображения за счет использования фильтров. При заданном контрасте изображения применение светофильтров позволяет также уменьшить удельные энергозатраты, что делает отсчетные устройства на светодиодах более экономичными активными приборами.

1.5. Газоразрядные отсчетные устройства и панели

Принцип действия различных газоразрядных отсчетных устройств основан на преобразовании электрической энергии в световую при возбуждении атомов газа электрическим ударом и их последующем гашении.

При построении *аналоговых газоразрядных устройств* используется прямая пропорциональная зависимость между током разряда I и площадью F_p , занимаемой разрядом:

$$I = jF_p,$$

где j – плотность тока на катоде в режиме нормального тлеющего разряда. Для проволочного катода

$$L_k = I / (\pi \cdot j \cdot d_k),$$

при этом L_k – длина катода, покрытого свечением (длина светящегося столба разряда);

d_k – диаметр катода.

Линейный газоразрядный индикатор (рис. 19, а) выполнен в виде стеклянного баллона 1, внутри которого размещены два электрода: стержневой молибденовый катод 4, проходящий через центральные отверстия в керамических изоляторах 3, и цилиндрический анод 2. По всей длине анода проходит щель для визуального наблюдения за свечением разряда, затянутая металлической сеткой, которая предохраняет стекло баллона от напыления материалом катода. Баллон заполняется смесью инертных газов $\text{He}+5\% \text{Ne}+1\% \text{Kr}$, которая дает оранжево-красный цвет свечения.

В наиболее распространенном типе ИН-13 фиксируется место возникновения тлеющего разряда в любом режиме работы. Для этого введен дополнительный электрод – вспомогательный катод 5 из циркония или ниобия, обладающий меньшим напряжением зажигания, чем основной катод из молибдена. Вначале разряд возникает между анодом и вспомогательным катодом, а с повышением напряжения – между анодом и основным катодом, при этом место возникновения основного разряда предопределено (зафиксировано) ранее возникшим разрядом на вспомогательном катоде. Это устраняет возможность появления светящегося столба на любом участке катода и повышает точность снятия отсчета.

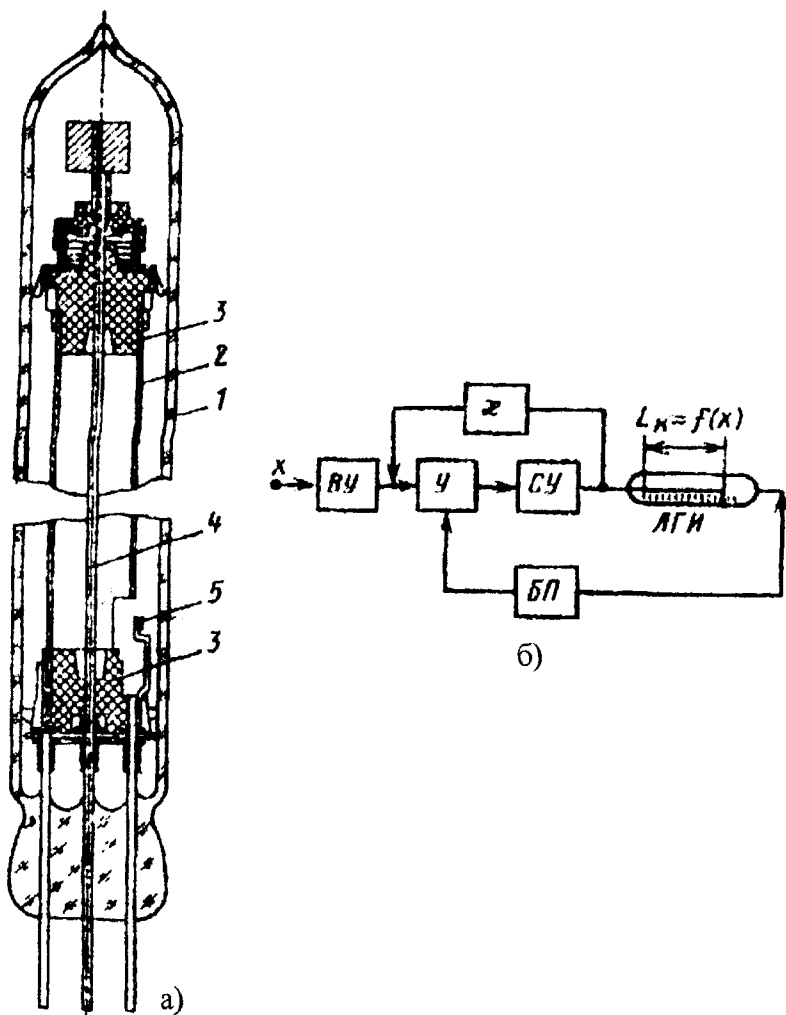


Рис. 19. Линейный газоразрядный индикатор

Газоразрядные отсчетные устройства аналогового типа могут быть использованы при создании различных одноканальных и многоканальных электроизмерительных средств и приборов, применяемых для измерения постоянных и переменных токов и напряжений, для индикации динамики измеряемых величин при работе в

комплексе с дискретными устройствами, например с цифровыми приборами, имеющими кодовый выход, для сравнения результатов измерений и выдачи оператору информации при достижении измеряемой или контролируемой величины заранее заданного или предельного значения.

Структурная схема одноканального прибора показана на рис. 19, б. Измеряемая величина x преобразуется входным устройством ВУ в напряжение, которое после усилителя У поступает в схему управления СУ линейного газоразрядного индикатора ЛГИ. Значение x измеряется по шкале в зависимости от длины L_k светящегося столба. Изменение коэффициента обратной связи x обеспечивает ряд пределов измерения; БП — блок питания.

Все одноканальные приборы как постоянного, так и переменного тока имеют узкопрофильное исполнение, одинаковые габаритные размеры и внешнее конструктивное оформление. Их выполняют как для горизонтального, так и для вертикального монтажа, и они фактически отличаются друг от друга только по виду шкал. Отечественная промышленность выпускает одноканальные щитовые аналоговые электроизмерительные приборы типов Ф212 (для постоянного тока и напряжения), ИФ213 (для переменного тока и напряжения), у которых в качестве основных элементов отсчетных устройств используются линейные газоразрядные индикаторы.

В основу конструкции многоканальных приборов положено блочно-модульное исполнение с применением унифицированных типовых конструкций. Число каналов соответствует, как правило, числу модулей в приборе, а расположение линейных газоразрядных индикаторов может быть горизонтальным или вертикальным, в зависимости от условий эксплуатации, при этом конструкция многоканальных приборов предусматривает возможность взаимозаменяемости модулей. Типовой модуль «Рубин-1» конструктивно выполнен в одном корпусе, в котором размещены линейный газоразрядный индикатор, шкала и плата печатного монтажа со схемой управления. Габаритные размеры позволяют расположить на метровой длине более 70 шт. таких модулей. На основе модуля «Рубин-1» строятся 4-, 6-, 8-, 10-, 20- и 25-канальные устройства измерения и контроля входных величин.

Линейные газоразрядные индикаторы и построенные на их основе отсчетные устройства обладают большой погрешностью (класс точ-

ности 4,0), которая обусловлена нелинейностью характеристики (нелинейность равна ± 2 мм, что при длинах рабочего участка 80 и 100 мм дает погрешность от ± 3 до ± 2 %) и влиянием температуры окружающей среды (температурные изменения длины светящегося столба в диапазоне 20... 50°C составляют ± 1 мм, т. е. от 1,2 до 1 %). Кроме того, они не имеют цифрового входа, что создает известные трудности при их сопряжении с современными дискретными устройствами.

Дискретно-аналоговые газоразрядные отсчетные устройства основаны на принципе направленного переноса разряда, и их конструктивно выполняют на основе газоразрядных индикаторов типов ИН-20, ИН-26, ИН-31.

В индикаторах ИН-20 и ИН-26 с неразделенными системами счета и индикации процесс набора и представления информации постоянно контролируется оператором, что особенно важно при использовании отсчетных устройств для целей регулирования и слежения, когда оператор должен наблюдать за динамикой изменения контролируемой или измеряемой величины. При одинаковом принципе действия более широкими эксплуатационными возможностями и лучшими техническими характеристиками обладает индикатор ИН-26.

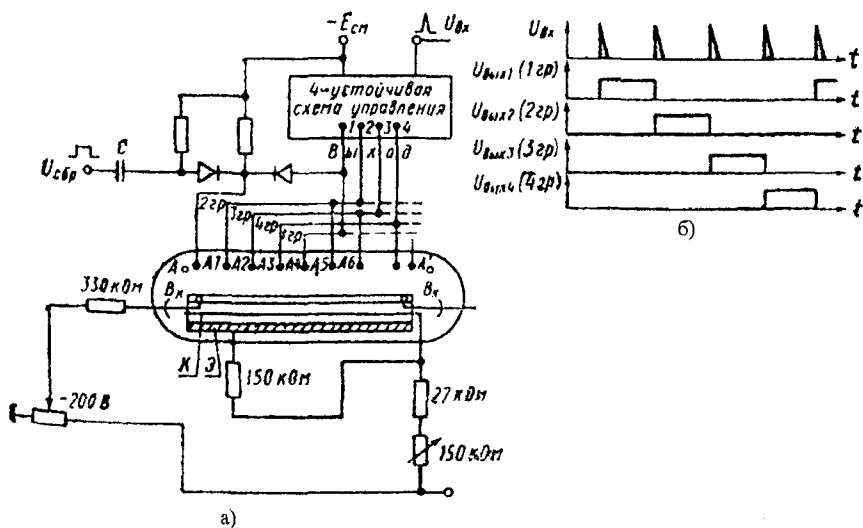


Рис. 20. Схемы включения и эпюры управляющих напряжений индикатора ИН-26

В конструкции индикатора (рис. 20) проволочный катод К размещен внутри экрана Э с щелью. Анодный узел состоит из вогнутого цилиндрической формы основания, на которое накручивается четырехходовая спираль из тонкой проволоки. Анодом газоразрядного промежутка является та часть витка спирали, которая параллельна рабочей поверхности экрана. Индикатор ИН-26 имеет 135 анодов, из которых 133 рабочих при шаге между ними 0,75 мм (у ИН-20-101 анод при шаге 1,5 мм) и два нулевых A_0 и A'_0 , которые вместе со вспомогательными катодами B_k и B'_k позволяют осуществить фиксацию начала светящегося столба с обоих концов шкалы. Все рабочие катоды объединены внутри баллона в четыре группы, что требует 4-устойчивой схемы управления. Для подключения к схеме питания и управления с двух сторон баллона-колбы имеются по пять гибких выводов.

При подаче питающего напряжения газовый разряд возникает между катодом и одним из анодов, принадлежащих группе, потенциал которой в этот момент выше, чем на других группах (рис. 20, б). С приходом счетного импульса на вход распределителя-формирователя потенциал анодов третьей группы становится выше потенциала анодов второй группы и разряд с анода А1 переходит на анод А2. С приходом следующего счетного импульса разряд перейдет на анод А3 четвертой группы и т. д. Таким образом, по мере поступления счетных импульсов разряд последовательно проходит все аноды, и схема управления переходит из состояния 1000 в состояние 0001, а оператор при этом наблюдает четко очерченную светящуюся точку, которая занимает определенное положение относительно начала отсчета, соответствующее величине входного параметра. Для сброса разряда импульс сброса через емкость С поступает на анод A_0 , при этом одновременно схема управления передает высокий потенциал через диод на анод A_0 и компенсирует отрицательное напряжение смещения $E_{см}$. Для сброса разряда на анод A_0 и изменения начала отсчета необходимо вместо анода A_0 и вспомогательного катода B_k подсоединить анод A'_0 и катод B'_k к соответствующей группе анодов, а остальные соединения схемы остаются без изменений.

В индикаторе ИН-26 информацию об измеряемом параметре можно получить и в виде светящегося столба шириной около 1,5 мм, который образуется при пачечном режиме, когда на схему управления поступают пачки импульсов, обеспечивающих режим непрерывной регенерации изображения столба. Частота импульсов

в пачке определяет длину светящегося столба в соответствии со значениями измеряемой величины и равна 15 кГц, а пачки импульсов подаются на схему управления с частотой следования 50 Гц, что выше критической частоты мельканий изображения.

Газоразрядные индикаторы ИН-31 имеют разделенные системы счета и индикации и по команде оператора представляют ему не промежуточный, а окончательный результат счета. Это особенно целесообразно в тех случаях, когда одновременно используется большое число отдельных отсчетных устройств, мелькание и перемещение светящихся элементов которых приводит к утомлению оператора. Индикатор ИН-31 состоит из трех блоков, смонтированных в одном корпусе: счетного, управляющего и индикаторного. В основу конструкции счетного блока заложены принципы построения индикатора ИН-26. Управляющий блок является промежуточным между счетным и индикаторным блоками и конструктивно выполнен из отдельных газоразрядных промежутков, каждый из которых имеет внутреннюю связь с соответствующим счетным промежутком. Индикаторный блок содержит два ряда индикаторных ячеек. Ячейки каждой пары, относящиеся к двум рядам, внутренне связаны друг с другом и с соответствующим газоразрядным промежутком управления. Индикатор выполнен в пластмассовом корпусе и имеет разъемы для подключения к электрической схеме.

Схема управления имеет пять устойчивых состояний. В начальный момент на схему управления счетным блоком подаются два вида сигналов – тактовые и счетные импульсы. При поступлении тактового импульса вырабатывается сигнал, который приводит к понижению напряжения на нулевом катоде, и при подаче питающего напряжения между нулевым катодом и соответствующим анодом возникает разряд. Одновременно с окончанием тактового импульса на вход счетчика поступает последовательность счетных импульсов, которая переводит схему управления из состояния 10000 в состояние 00001, и разряд направленно перемещается от нулевого к последнему катоду. Однако в режиме счета оператор не наблюдает перемещения разряда, так как потенциал на анодах индикации недостаточен для возбуждения, свечения разряда.

Если во время действия m -счетного импульса оператор подает команду на индикацию, то на соответствующих анодах управляющих и индикаторных блоков повышается потенциал и происходит зажи-

гание в m -индикаторной ячейке. С приходом $(m+1)$ - счетного импульса разряд в счетном блоке переходит на $m+1$ катод, а в индикаторном блоке m -ячейка погаснет и зажжется $(m+1)$ - ячейка. После окончания импульса команды индикации потенциалы на соответствующих управляющих и индикаторных анодах понижаются, свечение индикаторных ячеек прекращается, но в счетном блоке продолжается перемещение счетного разряда.

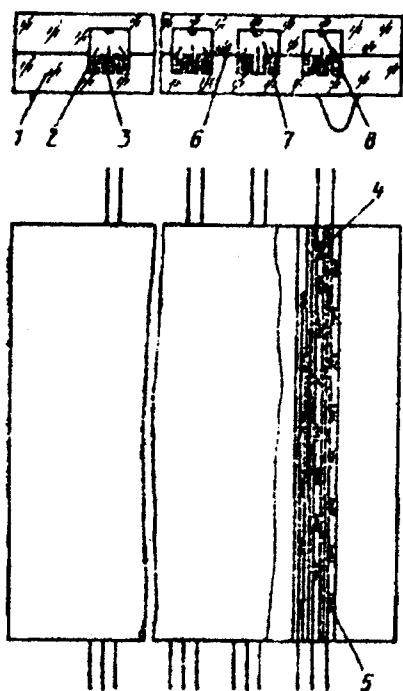


Рис. 21. Многошкальное устройство на газоразрядных индикаторах

На базе счетных индикаторов возможно создание многошкальных дискретно-аналоговых отсчетных устройств с параллельно расположенными шкалами (рис. 21). В продольный паз 2 стеклянной пластинки 1 уложена многокатодная система электродов 3 с нулевым 4 и последним 5 катодами. Катоды могут быть объединены в три группы, и крайние катоды имеют отдельные выходы. На нижнюю пластинку 1 вплотную накладыва-ется верхняя стеклянная пластинка 6, в каждом пазу 7 которой закреплен проволочный анод 8 малого диаметра, который не мешает визуальному наблюдению. Каждый канал имеет свою схему управления. Конструкция с 32 шкалами имеет шаг дискретности между каналами 35 мм, число дискретных состояний в канале 100, шаг дискретности между катодами одного канала 15 мм, габаритные размеры $192 \times 150 \times 10$ мм.

Цифровые газоразрядные отсчетные устройства создают на базе индикаторных тиратронов тлеющего разряда и цифровых газоразрядных ламп.

Из индикаторных тиратронов наиболее широко используют типы МТХ-90, ТХ-16Б, ТХ-17А, ТХ-19АЗ, ТХ-19АЖ, ТХ-19АК в виде

миниатюрных или сверхминиатюрных многоэлектродных ламп со стеклянным баллоном и гибкими выводами, из которых создают отсчетные устройства в виде мозаичных экранов модульной конструкции, что обеспечивает их удобную эксплуатацию и смену тиратронов, не нарушая межосевых расстояний между ними. В корпусе модуля размещают, как правило, тиратроны, схемы управления и необходимые разъемы.

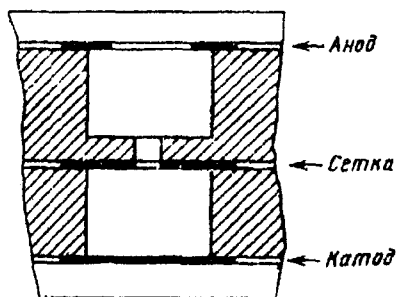


Рис. 22. Тиратронная матрица

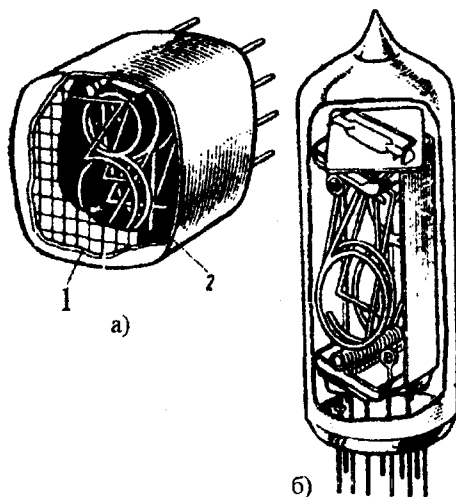
питания не более 30 мА, габаритные размеры $50 \times 90 \times 146$, масса 0,4 кг.

Создано световое табло модульной конструкции на тиратронах типа МТХ-90, построенное на базе ячеек, содержащее 7×5 светящихся элементов. Световое табло содержит 72 тиратрона в длину и 7 в ширину при расстоянии между соседними тиратронами 24 мм.

Использование современных интегральных методов изготовления газоразрядных устройств позволяет создавать монолитные тиратронные матричные панели. Основой конструкции панели является стеклянная пластина — матрица, в которой выполнено большое число тиратронов в виде газонаполненных ячеек сложной формы (рис. 22). В каждой ячейке имеются катод, сетка и анод. Электроды изготовляют методом пленочной технологии. В тиратронных панелях возможно объединение сеточных электродов в каждом вертикальном столбце, а в каждом горизонтальном — катодных электродов. Импульсы координатной выборки, приложенные к сеточному и катодному выводам, вызывают газовый разряд там, где они совпадают во времени и таким образом формируют требуемые цифровые символы. Наличие в ячейках подготовительного разряда обеспечивает малое время срабатывания и ввода информации, повышает стабильность работы панели.

Типовыми примерами модуля могут сложить цифровые устройства типов МИ-1 и МИ-2 на тиратронах ТХ-16Б, ТХ-17А и ТХ-19Л, состоящие из 28 тиратронов со встроенным преобразователем кодов из десятичной системы счисления в код засветки индикатора. Размеры цифр 55×38 мм, что позволяет считывать цифровую информацию с расстояния 15...20 м, потребляемый ток от источника

Независимо от способа соединения электродов каждая отдельная ячейка панели работает как тиратрон тлеющего разряда.



Цифровые газоразрядные лампы типа ИН (рис. 23) представляют собой баллон, внутри которого размещен один общий анод, выполненный в виде тонкой редкой сетки 1 и нескольких катодов 2, имеющих конфигурацию в форме цифр. Катоды расположены стопкой один за другим так, что образуется пакетная конструкция. В некоторых лампах для улучшения светотехнических характеристик анод выполняют из двух электрически соединенных между собой частей.

Рис. 23. Цифровые газоразрядные лампы

Аноды изготовляют из никелевой проволоки, а катоды – из никеля или титана. Для изменения цветности цифр в конкретных конструкциях цифровых устройств применяют наружные светофильтры или баллоны лампы покрывают цветным лаком. В целях уменьшения распыляемости материала катода и повышения долговечности лампы в состав газовой смеси вводят пары ртути.

При наличии рабочих напряжений между анодом и одним из катодов в газовой среде возникает разряд, который имеет форму катода-цифры. Свечение тлеющего разряда у работающего катода имеет ширину до 2 мм. Смена изображений цифр на одном знакоместе осуществляется последовательной коммутацией напряжений на разные катоды.

Для питания цифровых газоразрядных ламп применяют как постоянное, так и импульсное напряжение. Пульсирующий режим питания может осуществляться с помощью трансформатора и диода (рис. 24, б). При частоте следования импульсов 20...50 Гц максимальный импульсный ток может быть в 4... 5 раз выше тока при постоянном питающем напряжении.

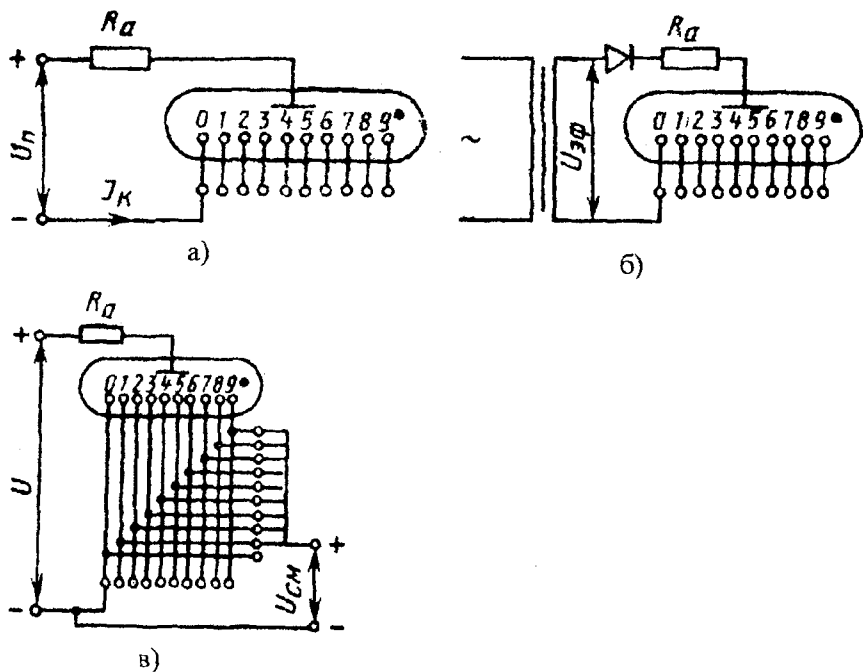


Рис. 24. Схемы питания газоразрядных ламп

Чтобы исключить зажигание нерабочих катодов и побочное свечение, которое создает фон и приводит к ухудшению четкости светящихся контуров цифр, применяют режим питания со смещающим напряжением (рис. 24, в), при котором нерабочие катоды имеют положительный потенциал по отношению к работающему катоду. Смещающее напряжение может использоваться как в режиме постоянного, так и в режиме пульсирующего питания, и минимальное его значение приблизительно равно половине напряжения зажигания.

Лампы с торцовым выводом и круглым баллоном обеспечивают минимальное расстояние между соседними лампами, большее по сравнению с размерами цифр, и их целесообразно использовать в отсчетных устройствах с небольшим количеством разрядов. Лампы с торцовым выводом и прямоугольной колбой можно располагать на панели близко друг к другу, что позволяет получить более удобную компоновку многоразрядных отсчетных устройств. Лампы с

боковым выводом цифр широко используют при создании цифровой аппаратуры и различных цифровых измерительных приборов.

В многоразрядных отсчетных устройствах цифровые лампы располагают по несколько штук в ряд на одной панели. В этом случае цифры отдельных ламп визуально воспринимаются оператором как расположенные на различной глубине, что является существенным недостатком такой конструкции из-за параллакса и уменьшения угла наблюдения. Указанных недостатков не имеют отсчетные устройства на плоских газоразрядных панелях.

В настоящее время существуют и разрабатываются следующие основные классы газоразрядных панелей: многоразрядные сегментные, постоянного тока с внешней адресацией, постоянного тока с самосканированием, переменного тока.

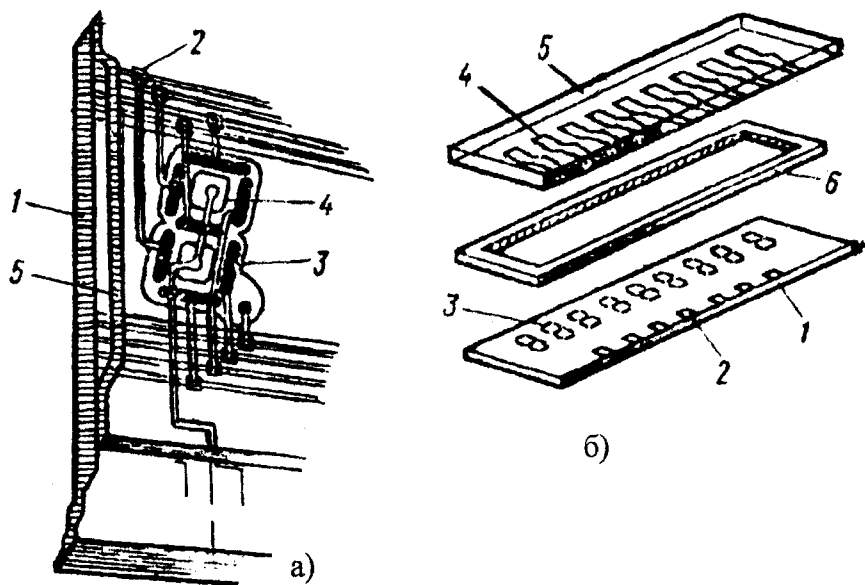


Рис. 25. Газоразрядные сегментные панели

Многоразрядные сегментные панели выполняют в виде плоского стеклянного корпуса (рис. 25, а). На диэлектрическую (керамическую или стеклянную) подложку 1 наносят катодные электроды-сегменты 3, контактные площадки 2, диэлектрический слой в

виде тонкой изолирующей пленки, закрывающей все участки металлизации, кроме рабочих участков катодов-сегментов. Сверху подложку накрывают стеклянной пластинкой 5 с нанесенным на ней рисунком прозрачных анодов 4 (обычно из двуокиси олова). Расстояние между электродами устанавливают с помощью промежуточной стеклянной пластинки 6 (рис. 25, б) и всю конструкцию герметизируют специальным стеклоцементом. Серийно выпускаются газоразрядные сегментные панели ГИП-11 в ИГП-17, которые применяют для отображения цифровой информации в настольных калькуляторах, кассовых аппаратах, различных измерительных приборах, радиотехнических устройствах и т. д.

Для управления многоразрядными цифровыми индикаторами используют схемы, в которых все одноименные сегменты цифр различных разрядов объединены и имеют общий вывод. Соединение цифровых панелей со схемой управления осуществляется с помощью контактных разъемов.

Газоразрядные панели постоянного тока с внешней адресацией (рис. 26) содержат нижнюю стеклянную пластинку 1, на внутренней поверхности которой выполнены пазы. В пазах параллельно друг другу размещены катодные электроды. Диэлектрическая матричная решетка 3 с перфорированными отверстиями отделяет (изолирует) катодную систему электродов от анодов 4, расположенных перпендикулярно к катодам. Решетка фиксирует межэлектродное расстояние, центры отверстий совпадают с местами пересечения проекций катодов и анодов, и в отверстиях решетки образуются элементарные газоразрядные промежутки, в которых при подаче управляющего напряжения возбуждается свечение. Анодная система электродов закрыта верхней стеклянной пластиной 5. Панель герметизируется слоем стеклокристаллического цемента 6. К полученной пакетной конструкции панели прикрепляется печатная плата 7, на которой производится распайка выводов электродов.

По рассмотренной конструктивной схеме выполнена газоразрядная панель постоянного типа ГИП-1000. Стеклянные пластины в панели изготовлены из плоского промышленного стекла платиновой группы толщиной около 5 мм. Высокая степень плоскостности рабочих поверхностей пластин (стрелка прогиба не более 0,05 % от линейных размеров) обеспечивает практическое постоянство межэлектродных расстояний между катодами и анодами по всему полю

панели. Матрица решетки толщиной 0,35 мм выполнена из фотосигалла, отверстия в ней имеют форму, близкую к квадратной, с размерами 0,6 x 0,6 мм, шаг расположения отверстий 1 мм. Аноды изготовлены из проволоки 47НД диаметром 0,1 мм. Стеклокристаллический цемент в виде порошка наносят по периферийной области стеклянных пластин, а при нагревании под грузом он растекается, смачивая соединяемые детали конструкции, кристаллизуется, образуя вакуумно-плотный шов шириной около 8 мм. Пакетную конструкцию панели устанавливают в корпус, в котором предусмотрены пазы для установки светофильтров или подобных устройств, места для монтажа. Печатную плату изготовляют из фольгированного гетинакса. По периметру платы размещены контактные площадки с шагом 2 мм.

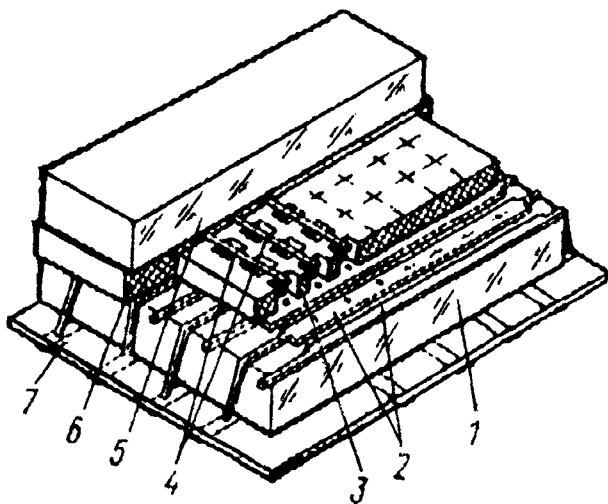


Рис. 26. Газоразрядная панель постоянного тока с внешней адресацией

На базе панели ГИП-1000 разработан матричный газоразрядный индикатор ИМГ-1 в виде модуля, предназначенного для преобразования электрических сигналов в видимое изображение, синтезированное из дискретных световых элементов в системе координат X, Y. Ввод информации осуществляется в 100-разрядном параллельно-двоичном коде (У1 – У100) с помощью анодных ключевых элементов, которые подают информационные сигналы на анодные элек-

троды, что соответствует координате У экрана. Развертка изображения в двухразрядном двоично-десятичном коде (X1 – X8) осуществляется с помощью катодного коммутатора по катодным электродам, принятым за координату X экрана индикатора.

По конструктивной схеме, аналогичной панели ГИП-1000, выполнены и газоразрядные индикаторные крупноэлементные панели ИГПП-32/32 и ИГПП-16/32, имеющие размеры светового элемента 3×3 мм, что обеспечивает уверенное считывание информации с расстояния 15...20 м. Конструкция позволяет собирать модули из нескольких панелей, которые можно соединять между собой при создании экранов практически любых размеров и конфигураций без потери информации по полю и в местах стыков панелей и модулей.

На основе серийно выпускаемой панели ИГПП-32/32 разработан газоразрядный матричный индикатор ИМГ-3. Индикатор содержит четыре указанные панели и схему управления, что позволяет создавать наборные экраны коллективного пользования практически неограниченных размеров.

Основными недостатками панелей постоянного тока с внешней адресацией, работающих в режиме циклического обновления информации, являются значительное время запаздывания зажигания ячеек (до 5 с) и необходимость использования достаточно сложного внешнего развертывающего устройства. Указанные недостатки уменьшают надежность работы отсчетных устройств и обуславливают высокую стоимость систем управления.

Газоразрядные панели постоянного тока с самосканированием (ГИПС) основаны на использовании направленного переноса тлеющего разряда по промежуткам сканирования аналогично переносу разряда с дискретно-аналоговых устройств. Такие панели используют преимущественно для систем отображения информации с небольшим количеством знакомест (от 16 до 200). Панели с самосканированием характеризуются простотой схемы управления, малой потребляемой мощностью, возможностью осуществления модуляции яркости в широких пределах, равномерным свечением всех элементов раstra.

Конструкция ГИПС (рис. 27) содержит опорную стеклянную пластинку 1, на рабочей поверхности которой выфрезерованы пазы 2. В пазах размещены аноды сканирования 3, и перпендикулярно к ним установлены катоды сканирования 8. В катодах выполнены отвер-

стия 9, расположенные напротив пазов для анодов сканирования. Катодная группа электродов включает также сплошной катод 7. Катоды сканирования объединены в n групп (не менее 3). Указанные конструктивные элементы образуют сканирующую часть конструкции панели с изолированными друг от друга разрядными каналами с индивидуальными анодами и общей катодной системой электродов. На катоды наложена перфорированная диэлектрическая матрица 4, отверстия которой совпадают с отверстиями катодов сканирования. Аноды индикации 6 расположены на матрице 4 параллельно анодам сканирования 3 и выполнены в виде проволочных ячеек пленочных электродов. Указанные элементы конструкции образуют индикаторную часть панели, которая сообщается со сканирующей частью через инжекционные отверстия в катодах. Сверху структура закрыта прозрачной стеклянной пластиной 5, и весь пакет панели герметизируется по периметру стеклокристаллическим цементом.

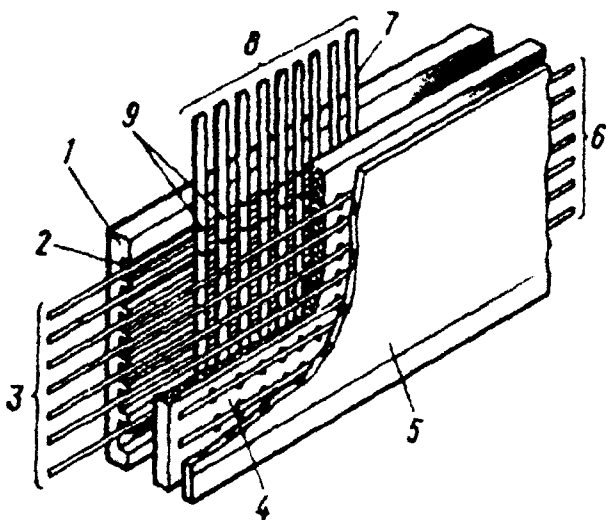


Рис. 27. Газоразрядная панель постоянного тока с самосканированием

При подаче напряжения питания на промежуток катод-анод сканирования в каждом канале сканирования возбуждается разряд. Перемещение газового разряда от нулевого катода к последнему осуществляется с помощью n -фазной импульсной схемы (n – число групп

катодов) одновременно по всем каналам. Когда разряд достигнет последнего катода, осуществляется одновременный сброс разрядов с помощью импульса, подаваемого на нулевой катод. При наличии разрядов в каналах сканирования через отверстия в катодах происходит диффузия заряженных частиц из сканирующих промежутков в соответствующие индикаторные ячейки, что обеспечивает снижение напряжения их зажигания. Таким образом, сканирующие разряды, последовательно воздействуя на все столбцы индикаторных ячеек, готовят их к зажиганию. Оператор практически не видит свечения сканирующих разрядов из-за малых размеров инжекционных отверстий в катодах. При подаче на аноды индикации управляющих положительных импульсов напряжения зажигаются только те индикаторные ячейки, которые в этот момент подготовлены сканирующим разрядом. В индикаторной ячейке разряд горит только в течение времени, которое не превышает устойчивого состояния схемы управления в одном из рабочих положений.

Рассмотренная конструкция положена в основу панелей с самосканированием ГИПС-16 на 16 знакомест оранжево-красного и зеленого цветов свечения и панели ИГПС-222/7 на 32 знакоместа. Воспроизводимое изображение в виде цифр синтезируется из 7×5 светящихся точек (индикаторных ячеек). Размеры цифр и толщина их обводки определяются шагом ячеек в строке и столбце и их диаметром. Для устранения мелькания изображение должно периодически обновляться с частотой кадровой развертки не менее 30 Гц.

В панели ГИПС-16 катоды объединены в три группы и перенос зарядов осуществляется с помощью трехфазной схемы, соединенной с группами катодов. В упрощенной структурной схеме управления панелью (рис. 28) код цифры после запоминающего устройства ЗУ поступает на знакогенератор ЗГ и далее на семь ключей анодов индикации $Ka_1—Ka_7$.

Для развертки используются счетчик на три СЧ-3, дешифратор ДШ и четыре катодных ключа $Kk_1—Kk_4$ (на три группы катодов и один нулевой катод K_0). Рабочая частота импульсов сканирования, временные соотношения между импульсами сканирования и индикации обеспечиваются схемой синхронизатора СН. В первом режиме работы панели ГИПС-16 на аноды сканирования подается напряжение $U_{лит} = (355 \pm 10) В$, на группе катодов импульсное напряжение $U_{ск}$ изменяется от уровня +100 В до нуля, коммутация на-

пряжения на анодах индикации $U_{ин}$ происходит от уровня $(+100 \pm 5)$ до уровня $(+250 \pm 5)$ В. Во втором режиме питания на аноды сканирования подается напряжение $U_{пит} = (250 \pm 10)$ В, импульсное напряжение на катодах $U_{ск}$ изменяется от нуля до -100 В, напряжение на анодах индикации $U_{ин}$ коммутируется от $(+150 \pm 5)$ В до нуля.

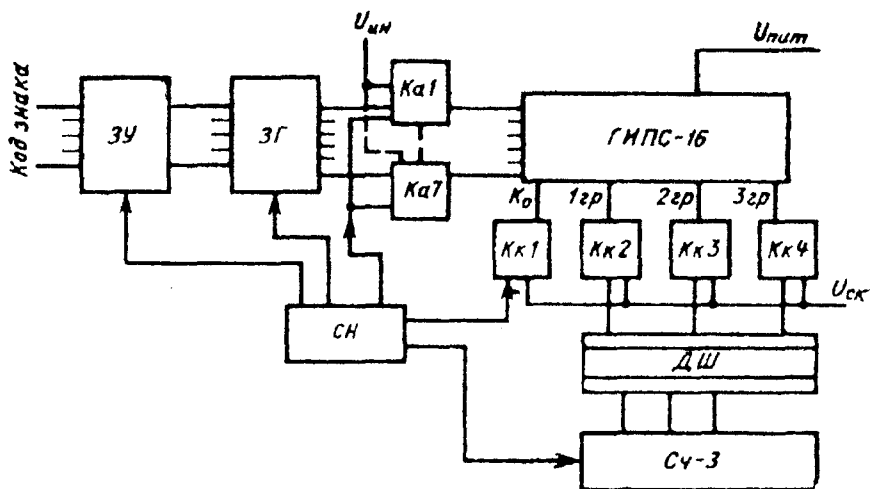


Рис. 28. Упрощенная структурная схема управления газоразрядной панелью ГИПС-16

На базе панели ГИПС-16 серийно выпускается универсальный индикаторный прибор ПИУ, который обеспечивает индикацию различных знаков и символов, в том числе цифровых. Он может быть использован для отсчета информации в ЭВМ, аппаратуре АСУ, станках с ЧПУ, промышленных роботах, контрольно-измерительных приборах и оборудовании и т. д.

Газоразрядная панель ГИПС на 16 знакомест зеленого цвета свечения имеет два варианта конструктивного исполнения: первый – с повышенной яркостью и напряжением индикации; второй – с параметрами, полностью соответствующими параметрам панели ГИПС-16 оранжево-красного цвета свечения. Динамическая яркость первого варианта панели составляет не менее 100 кд/м при коммутации напряжения на анодах индикации от $(+105 \pm 5)$ до $(+295 \pm 5)$ В (первый режим работы) или от нулевого уровня до $(+195 \pm 5)$ В (второй

режим работы). Люминофор возбуждается в основном ультрафиолетовым излучением катодной области разряда.

В панелях ИГПС-222/7 на нижней стеклянной пластине выполнены семь пазов, в которых уложены проволочные аноды сканирования. Перпендикулярно к анодам сканирования расположены 222 катодных электрода, в каждом из которых имеются семь инжекционных отверстий диаметром 70... 90 мкм. Катодные электроды соединены в пять групп. Из корпуса панели к схеме управления выводятся 14 выводов: 5 по числу групп катодов, 1 нулевой катод, 7 анодов индикации, 1 для подачи напряжения на аноды сканирования. Структурная схема управления панелью ИГПС-222/7 аналогична схеме для панели ГИПС-16, но в ней используется счетчик на пять и шесть катодных ключей (на пять групп катодов и один нулевой катод).

На базе состыкованных пяти панелей ИГПС-222/7 разработано устройство отображения информации с общей информационной емкостью 160 знакомест при общем числе знаков в строке, равном 32.

Газоразрядные панели переменного тока в зависимости от режима включения разделяют на панели с запоминанием информации (с памятью) и без запоминания информации (без памяти).

Конструктивно газоразрядная панель переменного тока с памятью состоит из двух стеклянных пластин 1 (рис. 29, а). С внутренней стороны пластин расположены системы взаимно перпендикулярных металлических электродов 2, покрытых изолирующим слоем диэлектрика 3, который защищен от действия газового разряда пленкой 4. Расстояние между пластинками фиксируется с помощью тонких диэлектрических прокладок 5, а зазор между ними заполняется газом под давлением, близким к атмосферному. Вся конструкция по периферии герметизируется с помощью стеклотемента 6.

Между системами вертикальных и горизонтальных электродов прикладывается знакопеременное опорное напряжение $U_{оп}$, амплитуда которого недостаточна для зажигания, но достаточна для поддержания газового разряда. Если на пару вертикальных и горизонтальных электродов подаются во временном интервале $t_1 - t_2$ импульсы записи $U_{зап}$ с суммарной амплитудой, достаточной для зажигания, то в соответствующей ячейке возбуждается газовый разряд (рис. 29, б). При наличии тока разряда I_p на конденсаторной структуре, образованной изолирующими слоями диэлектрика, покрывающего проводящие электроды, возникают электрические за-

ряды, создающие напряжение U_c , полярность которого противоположна полярности напряжения записи $U_{\text{зап}}$. В результате суммарное напряжение на газовой ячейке уменьшается, что приводит к самогашению разряда и ограничению длительности протекания тока I_p .

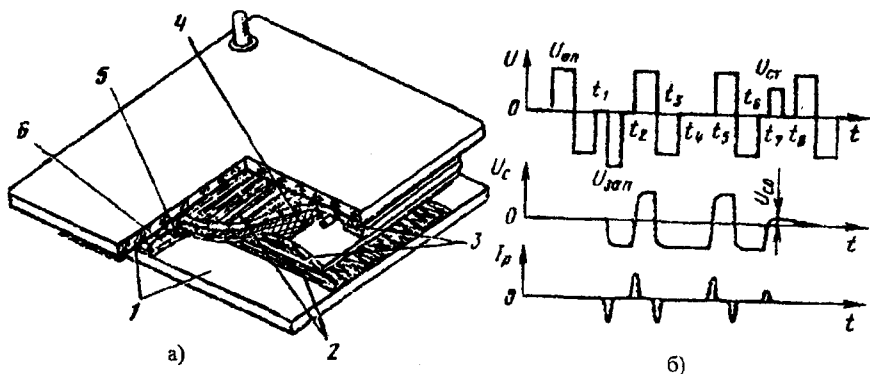


Рис. 29. Газоразрядная панель переменного тока с памятью

Так как время отекания возникших на диэлектрике разрядов относительно велико, то в последующий временной интервал t_2 - t_3 созданное ими напряжение U_c суммируется с изменившимся знаком опорным напряжением $U_{\text{оп}}$ и напряжение, приложенное к ячейке, оказывается достаточным для возникновения газового разряда. Указанный процесс будет повторяться в ячейке в интервалах времени t_3 - t_4 , t_4 - t_5 , t_5 - t_6 , t_6 - t_7 , и ячейка оказывается бистабильным элементом и может находиться в проводящем или непроводящем состоянии. Именно эта бистабильность, определяемая наличием или отсутствием заряда на диэлектрических слоях, позволяет получить запоминание информации на индикаторном поле панели. Для гашения разряда, например во временном интервале t_7 - t_8 , на ячейку подается стирающий импульс $U_{\text{ст}}$, который понижает напряжение на конденсаторной структуре до небольшой величины $U_{\text{со}}$, в результате чего повторное зажигание разряда в ячейке становится невозможным.

Применение таких панелей оправданно в основном в тех случаях, когда скорость поступления информации меньше или соизмерима со скоростью записи ее на панели. В других случаях предпочтительнее панели переменного тока, работающие в режиме внешней развертки (без памяти).

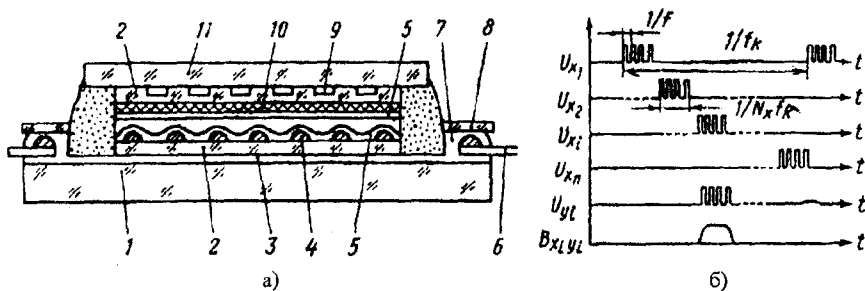


Рис. 30. Газоразрядная панель переменного тока без памяти

Конструктивная схема панели показана на рис. 30, а: 1 и 11 – нижняя и верхняя стеклянные пластинки; 3 и 9 – нижняя и верхняя взаимно перпендикулярные системы электродов; 2 – диэлектрическое покрытие; 4 и 10 – нижняя и верхняя изоляционные решетки; 5 – стабилизирующее покрытие; 6 – вывод; 7 – компаунд; 8 – стеклянная планка. Собранная панель представляет собой совокупность условно не связанных между собой функциональных ячеек. Каждая ячейка образуется участками перекрещивающихся нижних и верхних систем электродов, закрытых диэлектриком со стабилизирующим покрытием и отделенных друг от друга участками изоляционных решеток, образующих квадратную ячейку. При включении панели напряжение U_x поочередно поступает на вертикальные электроды x в виде пачки рабочих импульсов с частотой f (рис. 30, б). На каждом электроде x_i это напряжение действует в течение времени $(N_x f_k)^{-1}$, где N_x – число вертикальных электродов, f_k – частота повторения кадров. Напряжения U_x недостаточно для зажигания газового разряда в ячейках панели. Возбуждение разряда происходит только в том случае, когда на горизонтальные электроды y поступают такие же пачки импульсов U_y , но сдвинутые относительно пачки импульсов на электродах x . При этом зажигаются только те ячейки i , для которых импульсные напряжения U_{xi} и U_{yi} совпадают во времени.

1.6. Отсчетные устройства на жидких кристаллах

Принцип действия отсчетных устройств на жидких кристаллах основан на изменении электрооптических параметров жидкокристаллических веществ при наличии управляющего воздействия. Устройства на жидких кристаллах являются пассивными элементами. Они не излучают свет, а воспроизводят изображение либо за счет изменения рассеивающих свет свойств жидкокристаллической среды, либо за счет изменения прозрачности (оптической плотности).

Принципиальным преимуществом жидкокристаллических отсчетных устройств по сравнению с рассмотренными ранее является малое потребление мощности и независимость контраста изображения от уровня внешней освещенности. Кроме того, они имеют низкие пороговые напряжения, что обеспечивает их совместимость с интегральными схемами управления, высокотехнологичны, дешевы, обладают малым конструктивным объемом, позволяющим значительно сократить массу и габариты. К основным недостаткам можно отнести сравнительно малую скорость включения и выключения, что не позволяет эффективно отображать динамическую информацию; ограниченный диапазон рабочих температур.

Для создания отсчетных устройств наибольшее применение находят нематические жидкие кристаллы. Тонкий слой нематического кристалла прозрачен, так как в нем почти отсутствуют изменения направления ориентации молекул.

Основой конструкции отсчетных устройств на жидких кристаллах является жидкокристаллическая ячейка (рис. 31), состоящая из двух плоских стеклянных пластин 1, на внутренние поверхности которых нанесены электроды 3 и 4, подключенные к источнику питания. Конструкция одного электрода, например 3, определяет форму изображаемой цифры или сегмента, и он выполнен в виде тонкой прозрачной пленки из электропроводящего материала, в частности окислов олова SnO_2 или индия In_2O_3 . Второй электрод 4 сплошной. Электроды разделены прокладкой 5 толщиной 10...20 мкм, и промежуток между ними заполняется жидким кристаллом 2. Для устранения воздействия на кристалл окружающей среды предусмотрена герметизация ячейки.

Устройства на жидких кристаллах могут работать как в проходящем (рис. 31, а), так и в отраженном (рис. 31, б) свете. В первом

случае оба электрода прозрачны для излучения и требуется дополнительный источник света. Во втором случае один задний электрод 4 непрозрачен, и он представляет собой зеркальный слой отражающего материала (Al, Ni, Cr). Изменение цветности видимых оператором цифр обеспечивается установкой соответствующих фильтров перед ячейкой или подкрашиванием самого жидкого кристалла.

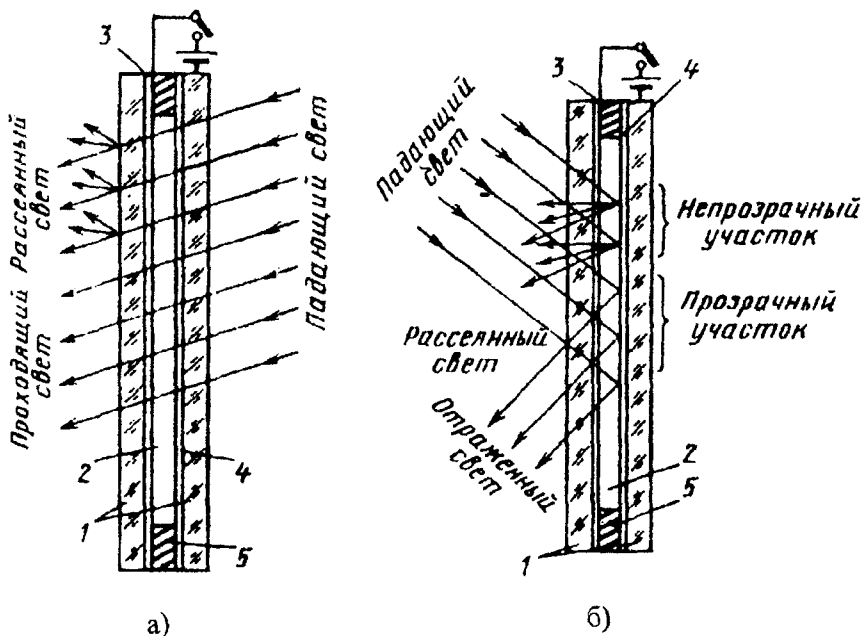


Рис. 31. Жидкокристаллические ячейки

Из известных электрооптических эффектов в жидких кристаллах практическое использование в отсчетных устройствах находят эффект динамического рассеяния и полевой «твист-эффект». Для эффекта динамического рассеяния первоначальная ориентация молекул жидкого кристалла может быть любой, в частности планарной или гомеотропной (при планарной ориентации длинные оси всех молекул направлены параллельно поверхности электродных пластин, а при гомеотропной – перпендикулярно к ним). Требуемое состояние ориентации молекул жидкого кристалла достигается со-

ответствующей обработкой поверхностей пластин. Предположим, что при отсутствии управляющего напряжения на электродах слой жидкого кристалла имеет планарную ориентацию молекул. В момент приложения напряжения диполи молекул ориентируются по полю, упорядоченность молекул возрастает, прозрачность слоя увеличивается. При напряжении поля выше порогового ионы, двигаясь от катода к аноду, вызывают турбулентность при выравнивании осей молекул по направлению движения ионов. В свою очередь, турбулентность приводит к локальному изменению показателя преломления жидкокристаллического вещества. В результате происходит рассеяние света: участки жидкого кристалла, находящиеся в состоянии динамического рассеяния, ярко светятся по сравнению с соседними невозбужденными участками.

В жидкокристаллических устройствах, работающих на основе «твист-эффекта», используется нематический жидкий кристалл с закрученной на 90° структурой молекул, которая может быть практически получена натиранием поверхностей электродов ячейки во взаимно перпендикулярных направлениях. В результате молекулы кристалла вблизи поверхности пластин ориентируются взаимно перпендикулярно, а в глубине слоя жидкого кристалла возникает спиральная укладка нематических плоских структур. Ячейку с такой структурой помещают между скрещенными поляроидами. При подаче напряжения на электроды закручивание структуры исчезает, жидкий кристалл принимает нормальную ориентацию молекул, свет не проходит через поляриды и рабочий сигнал выглядит темным на светлом фоне. Для получения светлого изображения на темном фоне один из поляризаторов необходимо повернуть на 90° .

Цифровые отсчетные устройства на жидких кристаллах являются наиболее распространенными, и они могут быть выполнены в двух вариантах: в виде пакетной конструкции с системой цифр и в виде плоской конструкции с системой сегментов. В первом случае устройство состоит из отдельных ячеек (рис. 32), располагающихся последовательно друг за другом. На каждой пластине, являющейся отдельным знакоместом и покрытой с обеих сторон прозрачной пленкой SnO_2 , с одной стороны вытравливается рисунок в виде одной из цифр от 0 до 9. С противоположной стороны пластины слой SnO_2 удаляют так, что он остается на области, занимаемой конфигурацией цифры. Расстояние между соседними пластинами фиксиру-

ется прокладками, промежуток между ними заполняется жидким кристаллом, высвечивание цифр управляется десятичным кодом. Такая конструкция достаточно сложна по технологическому исполнению, не обеспечивает большого угла наблюдения, требует применения источника подсветки, так как система расположения ячеек работает в режиме проходящего света.

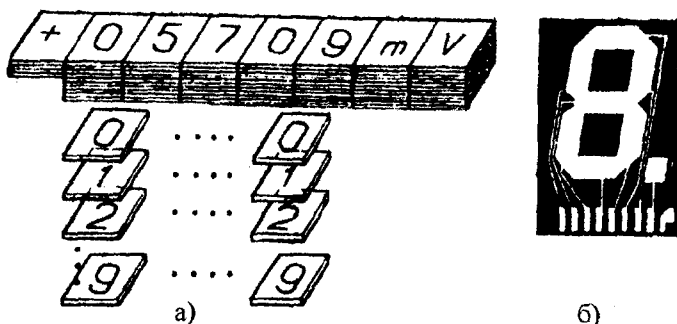


Рис. 32. Схемы цифровых устройств на жидких кристаллах

В плоской конструкции жидкокристаллического устройства (рис. 33) все цифры и их элементы располагаются в одной плоскости, что обеспечивает большой угол наблюдения при сравнительно высоком коэффициенте использования площади панели и простоте технологии изготовления. На две плоские полированные пластины, между которыми располагается слой жидкого кристалла, наносят пленки SnO_2 и на них вытравливают рисунки сегментов и электродов. При работе ячейки на отражение на заднюю пластину наносят отражающий слой из Al . Расстояние между сегментами обычно составляет 150 мкм, ширина выводов от контактных площадок к сегментам – 200 мкм.

Для практического использования в отсчетных устройствах и системах выпускаются одноразрядные и многоразрядные цифровые индикаторы на жидких кристаллах. Одноразрядные индикаторы выполняют в отдельных корпусах (рис. 33, а), что обеспечивает требуемый набор цифровых табло и при необходимости можно произвести их замену. В типовом металлостеклянном корпусе (рис. 33, б) слой 3 жидкого кристалла находится между пластинами 1 и 2, разделенными прокладками 4. Металлическая крышка 7 фланцем

5 герметически соединяется с верхней пластиной 1 через слой спеченного металлического порошка и припоя. На пластину 2 наносят металлический слой 6, который защищает поверхность пластин от повреждений. В металлополимерном корпусе (рис. 33, в) пластины 1 и 2, разделенные прокладкой 4 и между которыми находится слой 3 жидкого кристалла, герметизируются в пластмассовом корпусе 6, из которого выводятся внешние электроды 5.

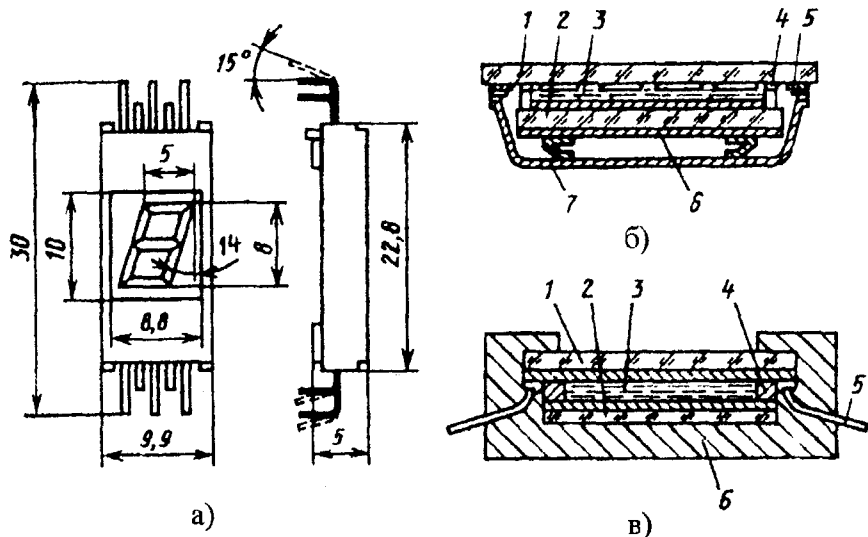


Рис. 33. Жидкокристаллические одnorазрядные цифровые модули

Для малогабаритных переносных измерительных приборов, калькуляторов удобно применение жидкокристаллических многоразрядных цифровых (рис. 34, а) и универсальных (рис. 34, б) панелей. На них выполняют гребенчатые гибкие выводы, с помощью которых обеспечивается соединение с печатной платой. На плате размещают схему управления. Применение гибких выводов позволяет регулировать угол наклона панели на приборной доске для получения оптимального углового положения панели относительно оператора.

Выпускаемые в настоящее время цифровые жидкокристаллические модули и панели находят применение в отсчетных и индикаторных устройствах индивидуального пользования с небольшой

площадью изображения. Это объясняется в первую очередь тем, что создание индикаторов с большой площадью изображения является сложной задачей из-за трудностей получения хороших жидкокристаллических тонких пленок больших размеров.

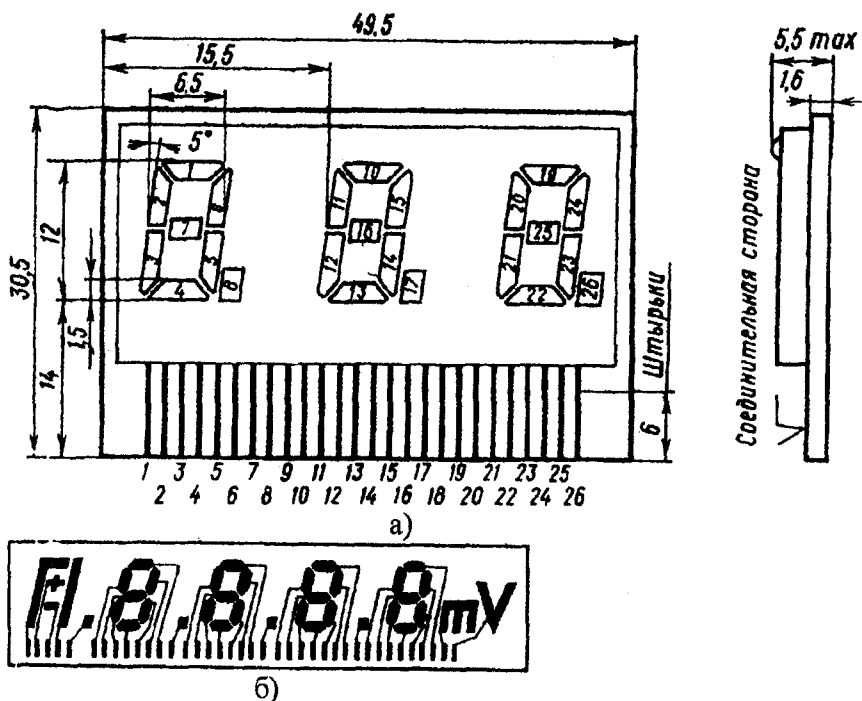


Рис. 34. Многоразрядные цифровые устройства на жидких кристаллах

В цифровых отсчетных устройствах электронных часов применяют в основном жидкие кристаллы с «твист-эффектом». Усложнение конструкций модулей и панелей за счет необходимости введения поляроидов оправданно, поскольку полевые эффекты дают возможность снизить управляющее пороговое напряжение до 1...4 В, потребляемый ток — на порядок, увеличить крутизну рабочей характеристики, значительно увеличить срок службы при питании устройства постоянным током.

Типовая структурная схема управления электронных часов с жидкокристаллическим цифровым индикатором на 6 разрядов пока-

зана на рис. 35. Сигнал с кварцевого генератора частотой 32 кГц подается на делитель, выполненный на БИС-1, с выхода которой сигнал частотой 64 Гц поступает на индикатор и на БИС-2 для дальнейшего деления на секунды, пересчета в минуты, часы и далее на дешифраторы единиц минут, десятков минут, единиц часов, десятков часов. Рабочие сигналы с дешифраторов БИС-2 поступают на соответствующие сегменты цифрового индикатора. Для питания БИС-1 требуется источник постоянного тока 2,5 В, для БИС-2 – напряжением 5 В, для индикатора переменного напряжения 4...10 В.

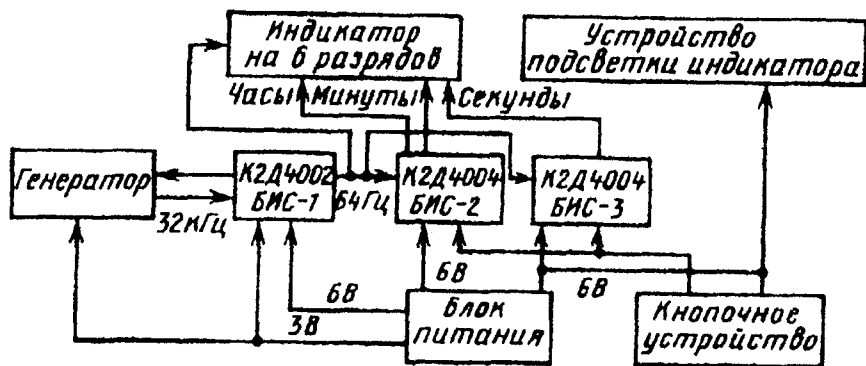


Рис. 35. Структурная схема управления электронных часов с жидкокристаллическим цифровым отсчетным устройством

Аналоговые отсчетные устройства на жидких кристаллах имеют электрод, выполненный в виде полосы удлиненной формы, сопротивление которого изменяется пропорционально увеличению его длины (рис. 36). Источник опорного напряжения $U_{оп}$ постоянно подключен к прозрачному высокоомному электроду 3, а напряжение U_x , пропорциональное измеряемой величине x , в определенной полярности подключено между низкоомным электродом 4 и одним из концов высокоомного электрода. Оба электрода 3 и 4 нанесены на соответствующие пластины 2, между которыми находится слой 1 жидкого кристалла. В результате напряжение $U_{жск}$ (рис. 36, б) прямолинейно изменяется по всей длине L высокоомного электрода и в некоторой точке $U_{жск} = 0$. Если U_n – пороговое напряжение возникновения электрооптического эффекта в жидком кристалле, то существует линейный участок, где выполняется условие $U_{жск} < U_n$, который

можно рассматривать как отсчетное окно. При изменении x отсчетное окно как указатель смещается пропорционально напряжению U_x . Если в устройстве установить эталонную линейную шкалу, то аналоговый жидкокристаллический индикатор можно использовать как линейное отсчетное устройство для измерения механических, электрических, тепловых и других величин.

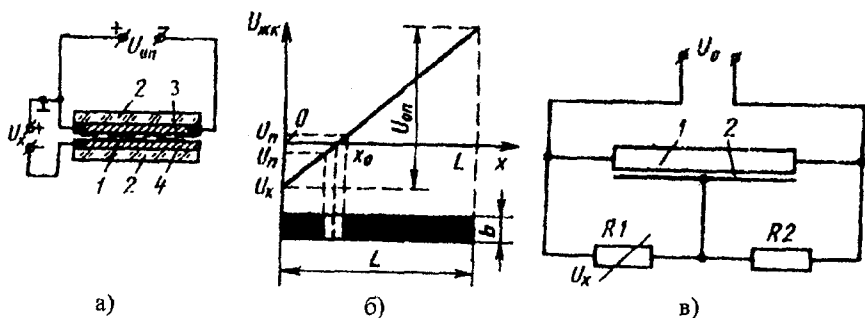


Рис. 36. Аналоговое отсчетное устройство на жидких кристаллах

При питании жидкокристаллического устройства от переменного напряжения рекомендуется схема с регулируемым делителем напряжения. К высокоомному электроду 1 подключен источник переменного напряжения U_0 (рис. 36, в). Измеряемое напряжение U_x управляет коэффициентом деления делителя, изменяя сопротивление одного плеча (R_1 на рис. 36, в). Напряжение с делителя подается на низкоомный электрод 2. В такой схеме включения обеспечивается синхронизация по фазе напряжений, снимаемых с обоих плеч делителя, и возможные отклонения напряжения от номинального значения не будут влиять на положение отсчетного окна-указателя.

1.7. Перспективы развития оптоэлектронных отсчетных устройств

Развитие современных оптоэлектронных отсчетных устройств и систем на ближайшие годы связано с улучшением комплекса их характеристик, разработкой новых устройств на основе традиционных наиболее изученных электрооптических эффектов, практической реализацией устройств на новых эффектах.

Вакуумные лампы накаливания являются достаточно современными приборами, и создание на их основе отсчетных устройств больших размеров для экранов коллективного пользования и мнемосхем вполне оправданно. Расширение эксплуатационных возможностей и областей применения ламп накаливания связано с разработкой устройств с буквенным изображением, близким по своим параметрам и размерам к существующим моделям цифровых ламп. Возможно дальнейшее усовершенствование ламп накаливания с использованием планарной технологии нанесения электродов или микропроволочных элементов накаливания.

Развитие и расширение области применения катодолюминесцентных отсчетных устройств связано с унификацией характеристик как цифровых, так и знаковых вакуумных ламп, увеличением их долговечности, снижением потребляемой мощности, разработкой унифицированных интегральных схем управления. Проводятся исследования по усовершенствованию катодного узла ламп, в частности созданию пленочных ненакаливаемых катодов.

Основными направлениями развития электролюминесцентных устройств являются: разработка и промышленное освоение электролюминофоров и активных структур, обладающих высокой яркостью свечения, малыми управляющими напряжениями, надежностью и работающих на переменном, постоянном и импульсном токе; создание многоэлементных матричных табло и экранов, отличающихся большой нелинейностью вольт-яркостной характеристики и малым влиянием «кросс-эффекта»; выбор и разработка схем управления с малыми паразитными емкостями и перекрестными связями, в частности с использованием оптронов.

Перспективы развития и применения отсчетных устройств на светодиодах связаны с решением ряда основных задач: улучшением качества существующих и разработкой новых типов полупроводниковых материалов, обладающих большой эффективностью, в частности $Al_xGa_{1-x}As$; расширением цветности излучения (в первую очередь на синюю область оптического спектра) и развитием светодиодов с управляемым цветом свечения; созданием интегральных схем управления в объеме активного кристалла, содержащего светоизлучающие элементы.

Газоразрядные устройства для систем отображения информации развиваются в направлении создания цифровых и знакографических газоразрядных индикаторных панелей с широкими функциональ-

ми возможностями. Расширение функциональных возможностей газоразрядных индикаторных панелей будет осуществляться в основном за счет использования многоцветных люминофоров, смонтированных в прибор схемы управления, электронно-оптических методов управления газоразрядных индикаторных панелей, конструкций наборных экранов коллективного пользования из отдельных блоков с узким швом герметизации, развития различных методов модуляции яркости. В частности, основным направлением создания цветных газоразрядных индикаторных панелей с высокой яркостью свечения является разработка конструкций панелей с катодовозбуждением и фотовозбуждением люминофоров.

Дальнейшее развитие жидкокристаллических отсчетных и индикаторных устройств для систем отображения информации в целях практической реализации их преимуществ связано с решением ряда основных задач: уменьшением инерционности и увеличением быстродействия и скорости переключения; уменьшением влияния температуры на временные характеристики жидкокристаллических веществ; созданием однородных на большой площади коммутирующих и накопительных жидкокристаллических элементов; разработкой цветных индикаторов на жидких кристаллах. Перспективно применение жидких кристаллов в матричных индикаторах для отображения больших массивов информации, в автономных периферийных устройствах информационно-измерительных систем, в устройствах и системах связи, управления и т. д. Ведутся работы по созданию жидкокристаллических индикаторов с перестраиваемым цветом на эффекте управляемого электрическим полем шага спирали холестерических жидких кристаллов и на эффекте «гость – хозяин» с применением красителей.

К перспективным устройствам, основанным на других электрооптических эффектах, в первую очередь следует отнести электрохромные и лазерно-лучевые индикаторы. Электрохромные индикаторы отличаются высокой контрастностью и четкостью изображения при высоком уровне внешнего освещения, широким углом наблюдения, наличием памяти, они совместимы с интегральной технологией и их можно изготавливать групповым методом, а при увеличении быстродействия на их основе можно создавать растровые индикаторы и телевизионные экраны. Принцип действия электрохромных индикаторов основан на изменении цвета определенных материалов под дей-

ствием электрического поля. К таким материалам относятся соединения, в которых полоса оптического поглощения может быть наведена или существующая полоса изменена под действием электрического поля. Лазерно-лучевые индикаторы относятся к универсальным устройствам синтеза и воспроизведения изображения. Однако их практическая реализация сдерживается существующими трудностями в управлении оптическим лазерным излучением.

2. РАБОЧИЕ МЕРЫ И ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ УГЛОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ

2.1. Рабочие меры

Рабочие меры являются важными элементами высокоточных угломерных приборов (УП), поскольку они выполняют в приборе роль эталона, с которым осуществляется сравнение угла в процессе его измерения. В связи с этим к рабочим мерам угломерных приборов предъявляют определенные требования, наиболее существенные из них:

воспроизведение с установленной точностью целых, кратных или дробных значений единицы угла;

возможность обеспечения проверки точностных параметров меры; сохранение требуемой точности меры в процессе эксплуатации УП; возможность изготовления меры с учетом существующей технологии в условиях опытного и серийного производства.

Рабочие меры УП в соответствии с выполняемыми функциями являются многозначными. В связи с этим к основным метрологическим параметрам в соответствии с ГОСТ 16263-70 и ГОСТ 8.009-84 относятся следующие:

цена деления равномерной шкалы или минимальная цена деления неравномерной шкалы меры;

начальное и конечное значения шкалы меры;

диапазон шкалы меры;

показатели точности меры;

пределы шкалы меры.

Для рабочих мер, обеспечивающих выдачу результатов измерений в цифровом виде, метрологическими параметрами являются выходной код, число разрядов кода, номинальная цена единицы наименьшего разряда кода меры и показатели точности меры. По-

мимо этого применяемая в конкретном приборе рабочая мера имеет ряд конструктивных параметров и характеристик, определяемых принципом ее построения и характером использования.

Один из возможных вариантов классификации рабочих мер, применяемых в высокоточных УП, представлен на рис. 37.

Наиболее распространены пространственные меры, имеющие ряд положительных свойств: простоту конструкции, надежность, компактность. Однако применение пространственных мер в высокоточных УП, как правило, связано с определенными трудностями.

Прежде всего, при использовании пространственных мер процесс измерения больших углов является многоступенчатым.

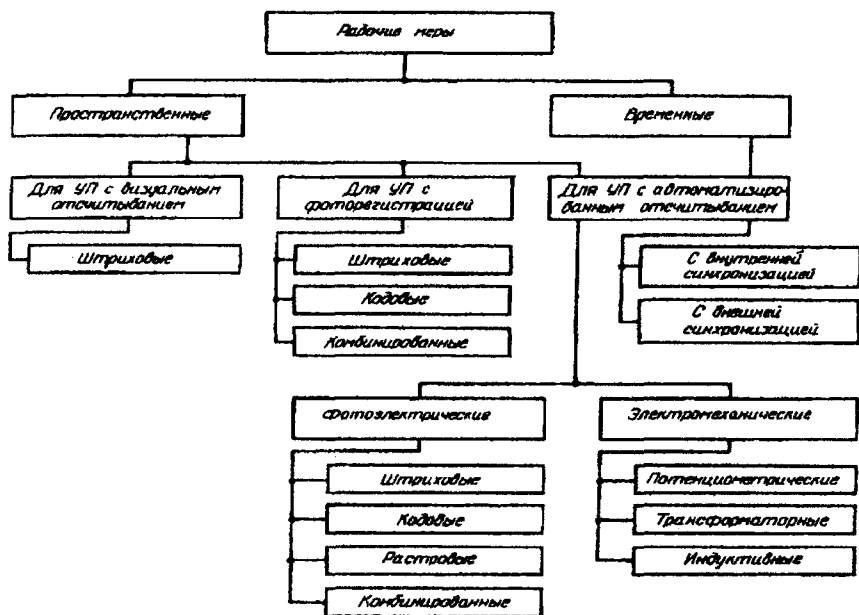


Рис. 37. Классификация рабочих мер высокоточных УП

Это определяется тем, что пространственная угловая рабочая мера при измерении полных углов должна быть размещена в оптимальных для использования на практике габаритных размерах УП и на ней не могут быть зафиксированы все дискретные направления, интервал между которыми соответствует угловой чувствительности

прибора. Поэтому на рабочей мере с предельной точностью тем или иным способом (например, штрихами) фиксируются дискретные направления со строго определенным интервалом между ними.

Определение измеряемого направления относительно меры выполняется в такой последовательности. Сначала положение измеряемого направления относительно поля объекта определяется по мере с точностью до интервала ее дискретности, т. е. снимается грубый отсчет. Затем с помощью дополнительного отсчетного устройства, в состав которого входит вспомогательная мера, определяется положение измеряемого направления относительно направлений, зафиксированных на мере, – снимается точный отсчет. При этом вспомогательная и основная меры однозначно связаны между собой, а их точностные характеристики соответствуют одна другой.

Как правило, в высокоточных УП требуемую точность удается обеспечить при использовании рассмотренной двухступенчатой схемы, однако иногда приходится использовать и трехступенчатую схему.

Сложность технологии изготовления пространственных мер также создает определенные трудности.

Основное преимущество использования временной меры заключается в простоте отсчитывания измеренного угла и удобстве представления выходной информации, что особенно важно при создании автоматических угломерных систем. Кроме того, высокая точность измерения временных интервалов, достигнутая в настоящее время, позволяет заметно повысить точность угловых измерений. Однако в УП с использованием временной меры требуется обеспечивать сканирование, что приводит либо к необходимой высокой степени стабилизации скорости взаимного перемещения изображения визируемого объекта и анализатора, либо к жесткой синхронизации сканирующей системы и опорного генератора временной меры.

2.2. Штриховые рабочие меры

Традиционными и наиболее распространенными рабочими мерами являются штриховые, представляющие собой последовательность штрихов, нанесенных на рабочую поверхность меры через определенные интервалы. В УП применяют круговые штриховые меры – лимбы и линейные шкалы. Лимбы являются основными мерами, а линейные шкалы используются обычно в отсчетных устройствах для

определения дробной части интервала основной меры. В некоторых случаях шкалы отсчетных устройств выполняются в виде секторов.

В высокоточных УП применяются лимбы исключительно с равномерным нанесением штрихов. При этом для градусной меры штрихи наносятся через 1; 1/2; 1/3; 1/6; 1/12; 1/15°, а для градусовой – через 1; 1/2; 1/5 град.

Пределы шкалы лимбов составляют полный угол, причем нулевой штрих совпадает с 360-градусным (либо с 400-градусным) штрихом. В связи с этим у лимбов пределы и диапазон шкалы меры совпадают. Точность лимбов определяется так называемыми погрешностями диаметров – полусуммой погрешностей положения двух штрихов, расположенных через 180° (200 град) по лимбу.

Погрешность положения отдельных штрихов в угловой мере определяется линейным смещением l_8 штриха при нанесении:

$$\delta'' = (l_8 / r) \rho'',$$

где r – радиус кольца делений лимба.

При измерении направлений погрешность положения отдельных штрихов неотделима от погрешностей, вызванных эксцентриситетом ϵ'' и неизбежно возникающих как при делении, так при установке лимба в приборе. Погрешность, вызванная эксцентриситетом, при отсчете по одной стороне лимба

$$\epsilon'' = (\epsilon \rho'' \sin(M - M_0)) / r,$$

где ϵ – эксцентриситет;

M – отсчет по лимбу, соответствующий измеренному направлению;

M_0 – отсчет, соответствующий направлению, проходящему через центр кольца делений и ось вращения отсчетного приспособления.

При $M = M_0 \pm 90^\circ$ максимальное значение погрешности, вызванной эксцентриситетом:

$$\epsilon''_{\max} = \rho'' e / r.$$

Как известно, при отсчете по двум диаметрально противоположным штрихам лимба погрешность, вызванная эксцентриситетом, практически полностью исключается, и при оценке влияния неточности изготовления рабочей меры следует использовать погрешность диаметра, которая с учетом независимости и случайности погрешностей положения противоположащих штрихов определяется выражением

$$\delta_d = (\delta_m + \delta_{m+180^\circ}) / 2\sqrt{2},$$

где δ_m – погрешность положения штриха лимба, соответствующая отсчёту M ;

δ_{m+180° – погрешность положения диаметрально противоположного штриха лимба.

Основным геометрическим параметром штриха лимба является его ширина. Видимая в окуляр отсчетного устройства ширина штриха b_0 должна составлять приблизительно 0,1 мм. Следовательно, ширина штрихов, наносимых на лимб:

$$b = b_0 / \Gamma_m,$$

где Γ_m – увеличение оптической системы отсчетного микроскопа.

В настоящее время штрихи лимбов высокоточных УП выполняются бифилярными, что позволяет обеспечить более высокую точность отсчитывания и нанесения делений [1]. Расстояние между бифилярными штрихами желательнее иметь (1,5... 2) b , видимый интервал между штрихами находится в пределах (8... 12) b . Длину малого штриха обычно принимают равной 0,6 интервала, а длины средних и больших штрихов определяют из соотношений 1:1,5:2 или 1:1,3:1,7, причем за единицу принята длина малого штриха. Числовые отметки наносят у каждого градусного деления лимба. Ширина штрихов лимбов обычно составляет 2... 5 мкм.

Погрешности нанесения штрихов лимба определяются точностью делительной машины, на которой они выполняются, и складываются из погрешностей: систематической δ_{11} , короткопериодической δ_{12} и случайной δ_{13} .

Систематические погрешности лимба в значительной мере исключаются симметричной программой перестановок лимба либо

введением поправок. Систематическую погрешность можно оценить по эмпирической формуле

$$\delta_{11} = 50'' / (D_d K_6), \quad (1)$$

где D_d — диаметр кольца делений лимба (рабочий диаметр);

K_6 — коэффициент, учитывающий бифилярность штрихов; для одинарных штрихов $K_6 = 1$, для бифилярных — $K_6 = 1,41$.

Короткопериодические погрешности нанесения штрихов лимба возникают в тех случаях, когда число зубьев глобоидального червячного колеса делительной машины не совпадает с числом штрихов на лимбе. Для этих случаев принимают

$$\delta_{12} = 40'' / D_d. \quad (2)$$

Случайные погрешности диаметров лимба зависят от совокупности многих факторов. Эту зависимость также можно представить эмпирическим выражением

$$\delta_{13} = 100'' / (D_d K_6). \quad (3)$$

Суммарное значение полной погрешности рабочей меры находят средним квадратическим суммированием перечисленных погрешностей.

Для наиболее совершенных делительных машин погрешность нанесения штриха в линейной мере $l_\delta \approx 25$ мкм. Для среднего значения диаметра кольца делений лимба, равного 100 мм, эта погрешность в угловой мере составляет $\delta \approx 1''$, что дает погрешность диаметра $\delta_d \approx 0,7''$.

С учетом некоторых других факторов полная погрешность диаметра лимба указанного размера составляет $\sim 1''$.

При увеличении диаметра лимба угловые погрешности нанесения штрихов могут быть уменьшены. Так, для $r = 100$ мм предельно достижимая погрешность диаметра высокоточного лимба составляет $0,4...0,5''$.

Следует отметить, что в современных высокоточных угломерных приборах диаметры лимбов редко превышают 250 мм. У наи-

более точного из отечественных теодолитов Т05 диаметр кольца делений горизонтального лимба $D_d = 180$ мм. Для обеспечения стабильности и жесткости лимба из оптического стекла на практике найдены следующие соотношения его геометрических параметров: внешний диаметр $D \approx 1,1D_d$, внутренний диаметр $d = (0,3... 0,7) D$, толщина $t = (0,1... 0,05) D$.

Линейные шкалы для отсчетных приспособлений имеют цену деления, производную от цены деления лимба и определяемую при расчете отсчетного устройства. Диапазон шкалы соответствует цене деления лимба, а пределы ее несколько больше диапазона за счет дополнительных штрихов, выполняемых по обе стороны шкалы для определения крена отсчетного устройства.

Точностные характеристики линейных шкал определяются возможностями продольных делительных машин. Современные машины обеспечивают погрешность нанесения штрихов приблизительно 2 мкм при длине шкалы до 1000 мм. Поскольку шкалы отсчетных устройств УП значительно короче – 50... 100 мм, погрешность их изготовления составляет 0,5... 1 мкм. Соотношения между шириной и остальными геометрическими параметрами штрихов аналогичны рассмотренным выше.

К конструкциям узлов крепления лимбов предъявляют определенные требования, направленные на обеспечение надежности закрепления и устранения возможных деформаций при эксплуатации.

Соединение стекла лимба с оправой должно быть нежестким, но достаточно плотным. Значения коэффициентов линейного расширения материала оправы лимба и стекла должны быть близкими между собой. Между оправой лимба и деталями осевой системы, если они изготовлены из материалов с разным коэффициентом линейного расширения, может быть предусмотрен защитный пояс упругости, компенсирующий деформации при изменениях температуры среды. Поверхность базирования лимба в оправе должна быть обработана таким образом, чтобы не деформировать лимб при креплении. В конструкции крепления лимба обычно предусматривается пригонка перпендикулярности рабочей поверхности круга по отношению к оси вращения.

Все штриховые лимбы устанавливаются с возможностью их круговой перестановки в целях измерения углов на различных участках лимба для ослабления влияния погрешности делений на результат

измерения. Существуют два варианта конструкции крепления стеклянного лимба в высокоточном УП (рис. 38).

Аналогично лимбам крепятся в металлических оправках и другие детали из стекла, например, линейные рабочие меры – шкалы, линейки и др.

Штриховые меры в УП с фоторегистацией принципиально не отличаются от рассмотренных.

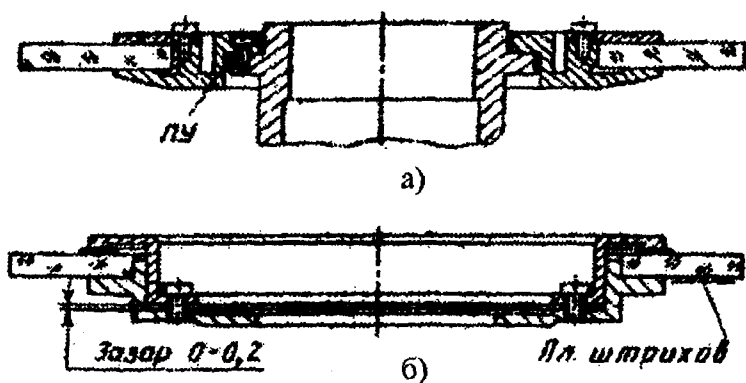


Рис. 38. Конструкции крепления стеклянного лимба:
а – с использованием защитного пояса упругости ПУ оправы;
б – с использованием упругой прижимной детали

Штриховые меры для фотоэлектрических преобразователей обычно выполняются с большим числом штрихов и не имеют числовых отметок. При этом возможны меры с темными штрихами на светлом фоне и со светлыми на темном, а также меры с шириной штрихов, равной ширине интервала между штрихами.

2.3. Кодовые рабочие меры

Кодовые рабочие меры строятся на принципе соответствия каждому их дискретному угловому или линейному положению одной цифровой кодовой комбинации. Цифровые коды могут быть реализованы на основе любой системы счисления, однако на практике наибольшее применение получили двоичные и двоично-десятичные коды различных видов.

Наиболее простым из них является естественный двоичный код. При построении меры в этом коде весь диапазон изменения угла или линейного перемещения разбивают на равные интервалы (шаги квантования) и каждому интервалу ставят в соответствие двоичное число. При этом шаг квантования должен соответствовать угловому δ или линейному Δ разрешению меры.

Кодовые шкалы угломерных приборов обычно представляют собой стеклянные круги или пластинки, на которых выполнена система примыкающих одна к другой разрядных дорожек – кольцевых или линейных – с прозрачными и непрозрачными участками. При этом число таких участков от разряда к разряду увеличивается в 2 раза (рис. 39).

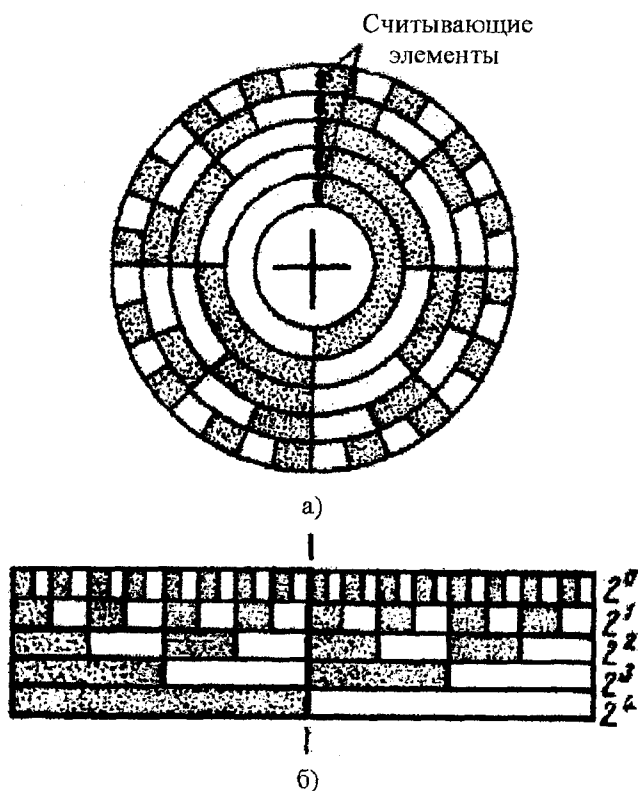


Рис. 39. Шкала меры на основе простого двоичного кода

Число разрядов кодовой шкалы определяется выражениями:
для круговой кодовой шкалы (рис. 39, а)

$$p_k = \log_2 (360^\circ / \delta),$$

для линейной кодовой шкалы (рис. 39, б)

$$p_l = \log_2 (L / \Delta),$$

где L — длина шкалы.

Как видно из рисунков, каждому положению кодовой шкалы соответствует вполне определенное двоичное число. Считывание информации (рис. 40) с кодовой шкалы 3 осуществляется с помощью линейки 5 фотодиодов, размещенных за узкой щелью 4. Подсветка щели осуществляется источником света с использованием конденсора 2. Число фотодиодов линейки 5 соответствует числу разрядных дорожек.

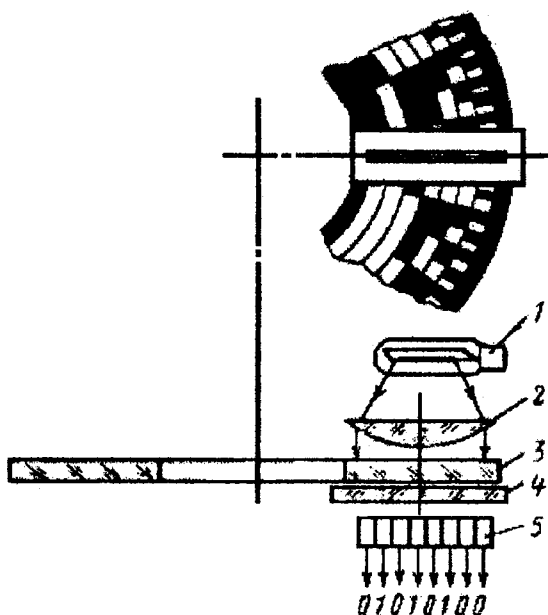


Рис. 40. Оптическая схема кодового преобразователя

Основным недостатком шкал с естественным двоичным кодом является то, что на некоторых участках кодовой маски два соседних числа могут отличаться значениями всех или большинства своих разрядов. В связи с тем, что шкалы изготавливаются с определенными погрешностями, а считывающие элементы устанавливаются в пределах некоторого допуска, на указанных участках могут возникать большие погрешности. Устранения этих погрешностей считывания добиваются либо за счет получения избыточной информации путем использования более чем одного ряда считывающих элементов с последующей логической выборкой сигналов с них, либо за счет использования специальных однопеременных кодов с последовательным изменением только одной двоичной единицы. Первый путь состоит в использовании методов «двойной щетки» и V-образного расположения считывающих элементов (V-код).

Метод «двойной щетки» основан на использовании двух считывающих элементов на каждый разряд, кроме младшего, причем считывающие элементы располагаются симметрично относительно оси считывающего элемента младшего разряда на расстоянии от нее, равном половине интервала младшего разряда (рис. 41). При этом считывание выполняется в соответствии со следующим правилом: если в младшем разряде фиксируется «0», то сигналы с других разрядов снимаются с опережающего ряда считывающих элементов, если же в младшем разряде фиксируется «1», то - с отстающего ряда считывающих элементов.

Однако в этом методе допуск на установку всех считывающих элементов достаточно жесткий, особенно при высокой разрядности кодовой шкалы, что является недостатком метода «двойной щетки».

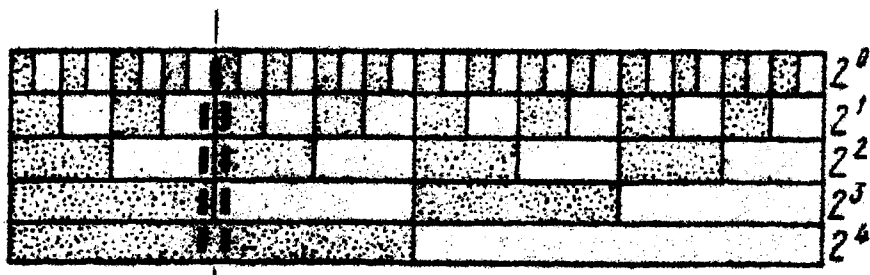


Рис. 41. Шкала меры со считыванием по методу «двойной щетки»

Суть метода V-образного расположения считывающих элементов поясняется рис. 42. В младшем разряде, так же как и в предыдущем случае, используется один считывающий элемент. Во всех остальных разрядах - два элемента, причем расстояние между ними равно интервалу предыдущего разряда со стороны младшего. Вследствие этого по мере удаления от младшего разряда расстояние между считывающими элементами в паре увеличивается.

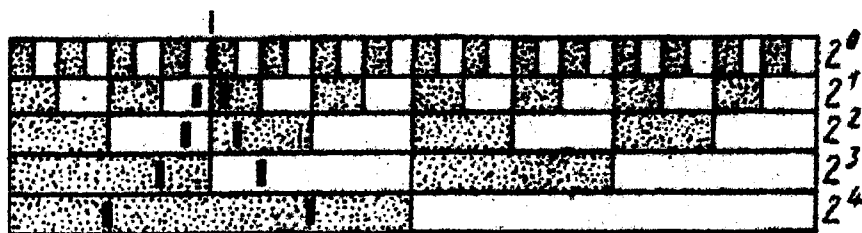


Рис. 42. Шкала меры со считыванием в V-коде

Считывание со шкалы V - кода выполняется в соответствии со следующим правилом: если в i -м разряде фиксируется «0», то считывание в $(i + 1)$ -м разряде выполняется с «опережающего» элемента, если же в i -м разряде фиксируется «1», то считывание в $(i + 1)$ -м разряде осуществляется с «отстающего» элемента.

Преимущество V-кода заключается в расширении допусков на изготовление шкалы и установку элементов при переходе к соседнему старшему разряду. Вместе с тем, поскольку код самого старшего разряда может быть определен только после того, как определены коды всех предыдущих разрядов, время преобразования увеличивается, и это сказывается на быстродействии УП.

В какой-то степени отмеченные недостатки обоих методов можно устранить, если расположить считывающие элементы по прямой линии и увеличить вдвое число кодовых дорожек всех разрядов, кроме младшего. При этом в получившихся подразрядах структуры элементов должны быть сдвинуты в соответствии с указанными выше правилами считывания. Это так называемый двоично-сдвинутый код. Однако в этом случае требуется преобразование кодов в естественный двоичный код. Кроме того, структура шкалы существенно усложняется.

Второй путь устранения неоднозначности считывания заключается в применении кодов, в которых переход от одного шага квантования к другому сопровождается переменной кода только в одном разряде.

Эти коды получили название рефлексных (отраженных), поскольку у них значения цифр в любом младшем разряде являются зеркальным отражением по отношению к метке, проходящей через границу изменения числа в старшем разряде.

Среди подобных кодов наибольшее распространение получил двоичный циклический код (код Грея).

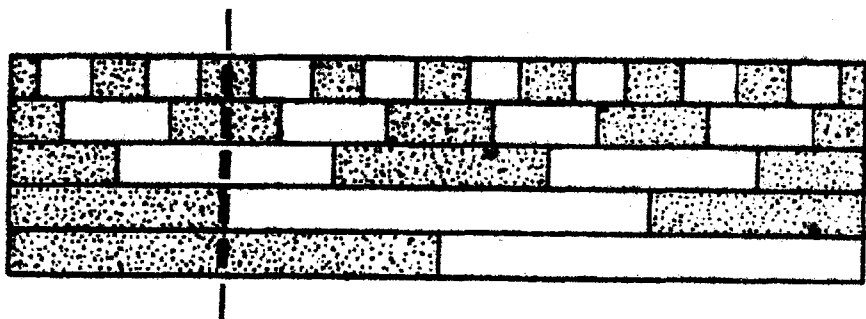


Рис. 43. Шкала меры на основе двоичного циклического кода (кода Грея)

Структура шкал, построенных на основе этого кода, показана на рис. 43. Преобразование числа, записанного в естественном двоичном коде, в циклический двоичный код выполняется по формуле

$$b_i = a_i \oplus a_{i+1},$$

где b_i – двоичное число разряда циклического кода;

a_i – двоичное число разряда естественного двоичного кода;

\oplus – знак сложения двоичных чисел без учета переноса в старший разряд.

Если $i = n$, то $a_n = b_n$, так как $a_{n+1} = 0$.

Как видно из рис. 43, при переходе к очередному шагу квантования происходит смена цифры только в одном из разрядов, и, таким образом, погрешность неоднозначности не превышает единицы младшего разряда. Кроме того, преимущество рассматриваемого кода заключается в том, что длина прозрачных и непрозрачных участков всех раз-

рядов, кроме старшего, в 2 раза больше, чем у шкал с естественным двоичным кодом. Это позволяет повысить разрешающую способность вдвое по сравнению с естественным двоичным кодом.

К недостаткам мер с циклическим кодом следует отнести жесткие допуски на их изготовление и регулировку считывающих элементов, а также необходимость применения специальных преобразователей в естественный двоичный код, реализующих следующее правило:

$$a_i = b_i \oplus a_{i+1}.$$

При $i = n$ $a_n = b_n \oplus a_{n+1}$; так как $a_{n+1} = 0$, то $a_n = b_n$, и далее

$$a_{n-1} = b_{n-1} \oplus a_n = b_{n-1} \oplus b_n;$$

$$a_{n-2} = b_{n-2} \oplus a_{n-1} = b_{n-2} \oplus b_{n-1} \oplus b_n;$$

.....

$$a_i = b_i \oplus a_{i+1} = b_{i+1} \oplus b_{i+2} \dots \oplus b_{n-1} \oplus b_n$$

или

$$a_i = \sum_{k=i}^{k=n} b_k \pmod{2}.$$

Таким образом, преобразование числа из циклического кода в естественный двоичный код происходит последовательно, начиная со старшего разряда.

В связи с тем, что в вычислительных устройствах последовательного действия арифметические операции над последовательными кодами выполняются, начиная с младшего разряда, требуется полученную с циклического преобразователя информацию преобразовать в естественный двоичный код, зафиксировать его, а затем вводить в вычислительное устройство, начиная с младшего разряда, предварительно выполнив операцию по оборачиванию кода. Это усложняет схему и снижает быстродействие системы.

Считывание в циклическом коде можно выполнить и с обычной кодовой шкалы при соответствующем расположении считывающих элементов на разрядной дорожке, поскольку благодаря повторяю-

щейся комбинации прозрачных и непрозрачных участков возможно K_{k-1} различных положений считывающего элемента на k -й разрядной дорожке.

Это обстоятельство используется при создании малогабаритных преобразователей, когда считывающие элементы из конструктивных соображений невозможно разместить на одной прямой.

Помимо двоичных кодов существуют коды и с основаниями больше двух (троичный, четверичный, пятеричный), применение которых позволяет уменьшить число разрядов дорожек. Недостатками этих кодов по сравнению с двоичными являются увеличение числа считывающих элементов, жесткие допуски на положение этих элементов, необходимость использования специальных преобразователей для перевода информации, полученной в соответствующем коде, в двоичную систему. Поэтому эти коды не получили широкого распространения.

Если наряду с передачей информации в ЭВМ необходимо представлять ее в удобном для оператора виде, применяют двоично-десятичные коды (рис. 44). Шкалы этих кодов в простейшем случае имеют четыре разрядных дорожки для кодирования чисел от 0 до 9 и необходимое число дорожек для кодирования десятков: $10 \cdot 2^0$, $10 \cdot 2^1$, $10 \cdot 2^2$ и т. д.

При этом кодирование осуществляют любым двоичным кодом, в связи с чем системы с двоично-десятичным кодом имеют такие же преимущества и недостатки, которые присущи используемому двоичному коду.

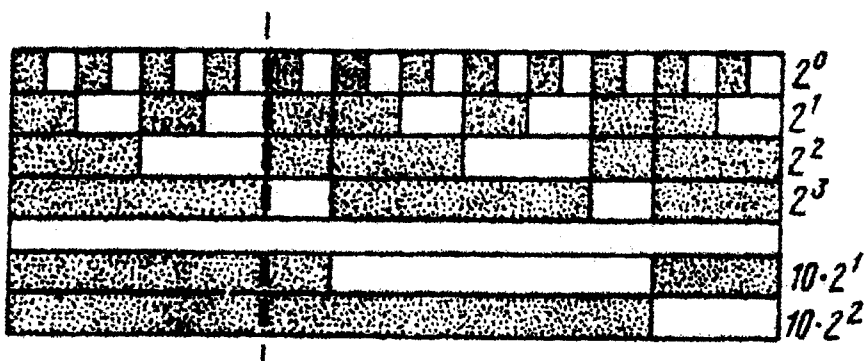


Рис. 44. Шкала меры на основе двоично-десятичного кода

Для повышения надежности считывания информации разработаны так называемые безопасные коды, в которых для контроля используется избыточная информация. К числу этих кодов относятся коды «2 из 5» и «5 из 10».

Код «2 из 5» (рис. 45, а) всегда состоит из комбинации двух непрозрачных и трех прозрачных участков, а код «5 из 10» (рис. 45, б) - из равного числа тех и других. При ошибочном считывании появится большее или меньшее, чем нужно, число двоичных единиц, что позволяет легко выявить ошибку.

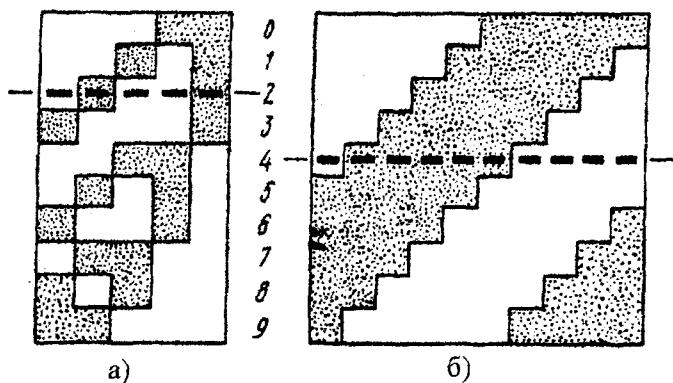


Рис. 45. Безопасные коды: а – код «2 из 5»; б – код «5 из 10»

В настоящее время разработаны корректирующие коды, которые наряду с выявлением ошибок позволяют их исправить. Это сложные коды, в которые введены дополнительные разряды, а на выходе по определенной логической схеме образуются вспомогательные суммы, по которым можно определить разряд, в котором при считывании произошла ошибка.

Как уже отмечалось, рабочие меры в виде кодовых шкал выполняются на стеклянных подложках. Вопросы технологии изготовления и контроля кодовых рабочих мер рассмотрены в работе [2].

Число штрихов младшего разряда определяется угловым разрешением δ :

$$N = 360^\circ / \delta.$$

В зависимости от требуемого разрешения, пользуясь табл. 2, можно определить разрядность диска p . Линейный размер c прозрачного или непрозрачного участков младшего разряда при известном диаметре D диска можно найти из выражения

$$c = \pi D / N.$$

Если взять максимальный из рекомендованных в п. 2.2 значений $D = 250$ мм, то при $\delta = 1''$ необходимо применять 20-разрядный кодированный диск, у которого $c \approx 0,37$ мкм. Помимо того, что изготовить такой диск нельзя, практически невозможно считать с него информацию, поскольку ширина считывающей щели должна быть еще меньше.

Таблица 2

Разрядность диска p	Число штрихов младшего разряда N	Шаг квантования δ
10	2 048	10' 32,8''
11	4 096	5' 16,4''
12	8 192	2' 38,2''
13	16 384	1' 19,1''
14	32 768	39,6''
15	65 536	19,8''
16	131 072	9,89''
17	262 144	4,94''
18	524 288	2,47''
19	1 048 576	1,24''
20	2 097 152	0,64''

При указанном значении D предельно допустимо получение 16-разрядного кодированного диска, у которого $c \approx 6$ мкм. Таким образом, реальный предел разрешения рабочей меры в виде такого кодированного диска составляет около 10''.

Для линейных кодовых шкал, которые могут быть использованы в качестве вспомогательных мер, линейное разрешение определяется значением $\Delta = 3 \dots 10$ мкм. Исходя из этого может быть найдена длина L шкалы при известном числе уровней квантования измеряемой величины.

Из рассмотренного следует, что кодовые преобразователи в высокоточных УП целесообразно использовать в качестве систем грубого отсчета, что имеет место в настоящее время при создании высокоточных угломерных систем.

2.4. Растровые рабочие меры

Растровые рабочие меры представляют собой преобразователи линейных или угловых перемещений, основанные на измерении смещений комбинационных полос в растровом сопряжении.

Как известно, при наложении одной растровой структуры на другую наблюдается муаровый эффект, который при определенных соотношениях между элементами растров и параметрами их взаимного ориентирования носит упорядоченный характер. При этом для малых взаимных угловых или линейных перемещений растров имеет место значительно большее смещение муаровых (или комбинационных) полос. В этом заключается основное преимущество растровых преобразователей, позволяющих обеспечить большой масштаб преобразования при измерении малых перемещений.

При высокоточных линейных и угловых измерениях применяют ограниченное число растровых сопряжений.

Для измерения малых линейных перемещений используются сопряжения двух линейных растров с параллельными штрихами.

В работе [2] показано, что шаг комбинационных полос при сопряжении двух линейных растров в общем виде определяется выражением

$$W = \frac{\omega_1 \omega_2}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega_1 \omega_2 \cos \alpha}},$$

где ω_1 и ω_2 – шаги сопрягаемых растров;

α – угол между направлениями штрихов растров.

Коэффициент преобразования перемещения (масштаб преобразования), показывающий, во сколько раз смещение полосы больше взаимного смещения растров, определяется как

$$\Gamma = \frac{W}{\omega_1} = \frac{\omega_2}{\sqrt{\omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega_1 \omega_2 \cos \alpha}}.$$

В табл. 3 показаны виды сопряжений растров, которые могут быть использованы в качестве рабочих мер в УП.

Из сопряжений линейных растров представляют интерес нониусное и муаровые двух видов. Преимуществом муарового сопряжения с $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ и $\alpha \neq 0$ является возможность изменения шага комбинационных полос за счет незначительного изменения угла α .

Таблица 3

Сопряжение растров, применяемых в качестве рабочих мер в УП

Вид сопрягаемых растров	Вид сопряжения	Шаг комбинационных полос	Коэффициент преобразования
Линейные с параллельными штрихами	Нониусное $\omega_1 = \omega; \omega_2 = \omega + \Delta\omega;$ $\alpha = 0$	$W = \frac{\omega(\omega + \Delta\omega)}{\Delta\omega}$	$\Gamma = \frac{\omega + \Delta\omega}{\Delta\omega}$
	Муаровое а) $\omega_1 = \omega_2 = \omega; \alpha \neq 0$ б) $\omega_1 = \omega;$ $\omega_2 = \omega \cos\alpha;$ $\alpha \neq 0$	$W = \frac{\omega}{2 \sin(\alpha/2)};$ $W = \omega \operatorname{ctg}\alpha$	$\Gamma = \frac{1}{2 \sin(\alpha/2)};$ $\Gamma = \operatorname{ctg}\alpha$
Радиальные	Нониусное радиально-центральных растров $\omega_1 \neq \omega_2; c = 0$	$\Omega = \frac{\omega_1 \omega_2}{\omega_2 - \omega_1}$	$\Gamma = \frac{\omega_2}{\omega_2 - \omega_1}$
	Муаровое радиально-центрального и радиально-нецентрального растров $\omega_1 = \omega_2 = \omega; c = 0$	$W \approx \frac{\omega}{\vartheta}$	$\Gamma \approx \frac{1}{\vartheta}$
Спиральные	Муаровое N-заходного спирального раstra с семейством равноотстоящих окружностей	$\Omega = \frac{2\pi}{N}$	$\Gamma = 1$
	Муаровое спиральных растров с одинаковым направлением спиралей	$\Omega = \frac{2\pi}{ N_2 - N_1 }$	$\Gamma = \frac{N_1}{ N_2 - N_1 }$

Частным случаем этого сопряжения является обтюрационное сопряжение (при $\alpha = 0$), для которого имеет место линейная зависимость пропускания излучения при смещении одного из растров от-

носителем другого. Применение этого сопряжения целесообразно при $\omega \geq 0,05$ мкм, так как при меньших значениях шага на качество сопряжения сильно сказываются погрешности растров, неточность масштаба, непараллельность светового пучка. Поэтому обтюрационное сопряжение иногда применяют в качестве грубой ступени отсчетного устройства.

Угловые растровые рабочие меры выполняются на основе сопряжений радиальных и спиральных растров (см. табл. 3). Среди сопряжений радиальных растров наиболее интересны нониусное сопряжение радиально-центральных растров и муаровое сопряжение радиально-центрального и радиально-нецентрального растров.

Преимуществом нониусного сопряжения является линейная зависимость углового перемещения комбинационных полос от угла поворота одного из растров.

При муаровом сопряжении радиальных растров, указанных в табл. 3, шаг комбинационных полос изменяется в зависимости от радиуса раstra. Однако в пределах одного комбинационного кольца можно считать средний линейный шаг раstra постоянным, причем

$$\omega \approx \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} w,$$

где ρ_1 и ρ_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы растрового кольца;

w – угловой шаг растров.

Шаг муаровых полос

$$W = \omega / \vartheta,$$

где

$$\vartheta = \arcsin \frac{\rho_1 \sin w}{\sqrt{(\rho_1^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos w + \rho_2^2)}}.$$

Радиус окружности, являющейся касательной к штрихам радиально-нецентрального раstra:

$$r = \arcsin \frac{\rho_1 \rho_2 \sin w}{\sqrt{\rho_1^2 - 2\rho_1 \rho_2 \cos w + \rho_2^2}}.$$

Положение комбинационной полосы на растровом кольце в пределах от ρ_1 до ρ_2 распределяется как

$$s \approx W\alpha / w,$$

где α – угол поворота подвижного растра.

Если число линий радиального растра меньше 100, что мешает получить требуемую плавность изменения функции пропускания растрового сопряжения, то более целесообразно использовать спиральные растровые сопряжения. При этом в качестве параметра спирального растра принимается число N заходов спирали.

Погрешность растровой меры определяется погрешностью изготовления растров и погрешностью, вызванной неточностью сборки растрового сопряжения.

Погрешность растра является суммой погрешностей шага, ширины и направления штрихов. Каждая из этих погрешностей включает случайную, периодическую и накопленную составляющие погрешности.

Погрешность шага штрихов растра является наиболее существенной, поскольку влияет на изменение интервала комбинационных полос и таким образом оказывает непосредственное воздействие на результат измерений.

Случайные составляющие погрешности шага возникают за счет непостоянства кинематических характеристик делительной машины, колебаний, вибраций отдельных ее частей и не могут быть устранены. У существующих делительных машин значение случайной составляющей равно 0,3... 0,5 мкм.

Периодические и накопленные составляющие погрешности шага определяются соответствующими погрешностями делительной машины и могут быть уменьшены ее регулировкой и стабилизацией технологического процесса изготовления.

Погрешность ширины штрихов оказывает влияние на световую характеристику растрового сопряжения, т. е. на зависимость пропускания от взаимного смещения растров. Эта погрешность особенно заметно сказывается в измерительных системах с интерполяцией доли интервала комбинационной полосы.

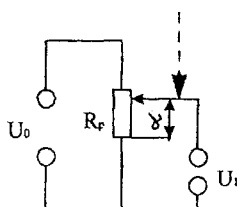
Погрешность направления штрихов приводит к искривлению комбинационных полос и изменению их ширины. Погрешности, вызванные неточностью сборки, возникают вследствие непараллельности плоскостей измерительного и индикаторного растров, колебаний их в процессе движения. На измерение угловых перемещений влияет радиальное и торцовое биение лимбов, кроме того, могут проявиться и отклонения от плоскостности заготовки, на которую нанесен растр.

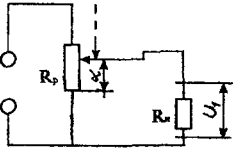
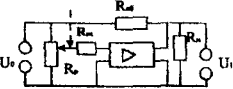
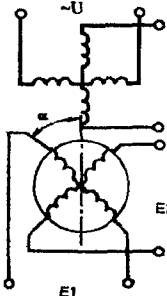
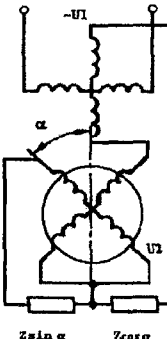
2.5. Электромеханические преобразователи

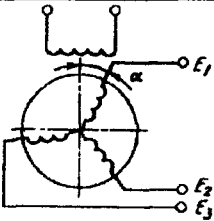
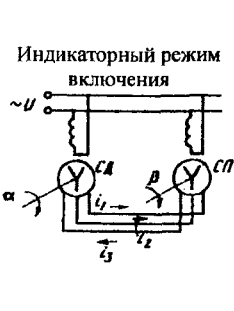

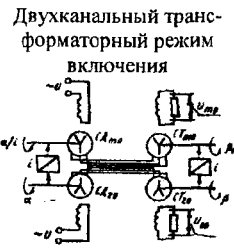
Электромеханические преобразователи могут выполнять функции рабочих мер в УП автономно или в сочетании с другими мерами. Некоторые типы электромеханических преобразователей используются для измерения полных углов. Из существующих преобразователей наибольшее применение находят потенциметрические, трансформаторные и индуктивные.

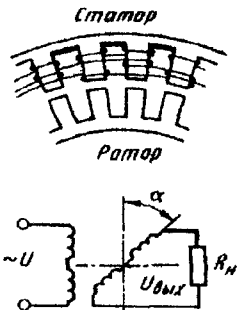
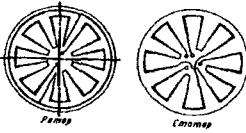
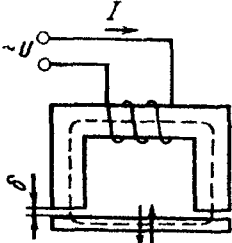
Основные свойства электромеханических преобразователей указаны в табл. 4.

Таблица 4

Вид преобразователя	Схема включения	Диапазон преобразуемых перемещений	Основные соотношения	Погрешность измерения
1	2	3	4	5
Потенциметрический	<p>Ненагруженная однотактная</p> 	<p>Для однооборотных $\leq 300^\circ$</p> <p>Для многооборотных до 7200°</p>	$U_1 := U_0 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_p}$ <p>где α — перемещение движка потенциметра; α_p — максимальное перемещение движка потенциметра</p>	<p>Для однооборотных преобразователей 0,1...0,2 %.</p> <p>Для многооборотных преобразователей 0,03...0,05 %</p>

1	2	3	4	5
Потенциометрический	<p>Нагруженная однотактная</p> 	<p>Для однооборотных $\leq 300^\circ$</p>	<p>$U_1 := U_0 \cdot \sigma \times \frac{\gamma}{\sigma \cdot (1 - \sigma) + \gamma}$, где $\sigma = \alpha/\alpha_p$; $\gamma = R_n/R_p$; R_n – сопротивление нагрузки; R_p – сопротивление потенциометра</p>	<p>Относительная погрешность</p> <p>$\delta := \delta^2 \times \frac{(1 - \delta)}{\delta \cdot (1 - \delta) + \gamma}$</p>
	<p>С усилителем с обратной связью</p> 	<p>Для многооборотных до 7200°</p>	<p>$U_1 := U_0 \cdot \frac{\alpha}{\alpha_p}$</p>	<p>0,05...0,1 %</p>
Трансформаторные: вращающиеся трансформаторы (ВТ)	<p>Синусно-косинусных ВТ</p> 	<p>$\pm 180^\circ$</p>	<p>$E_1 = K_1 \cdot U \cdot \sin \alpha$; $E_2 = K_1 \cdot U \cdot \cos \alpha$,</p> <p>где K_1 – коэффициент трансформации; α – угол поворота ротора</p>	<p>0,05...0,2 %</p>
	<p>Линейных ВТ</p> 	<p>$\pm 60^\circ$</p>	<p>$U_1 := 0$</p> <p>$U_2 := U_1 \cdot k \times \frac{\sin \alpha}{1 + k_1 \cdot \cos \alpha}$,</p> <p>где k – коэффициент пропорциональности</p>	<p>0,05...0,2 %</p>

1	2	3	4	5
Много- полос- ные ВТ	—	$\pm 180^\circ$	$E_{\text{вых}} = E_p \sin(p \cdot \alpha)$, где E_p – макси- мальное значе- ние ЭДС	0,5...5'
Сельсины		0...360°	$E_1 = E_m \cdot \cos \alpha$; $E_2 = E_m \cdot \cos(\alpha + 120^\circ)$; $E_3 = E_m \cdot \cos(\alpha + 240^\circ)$, где E_m – макси- мальное значение ЭДС в фазовой обмотке ротора; α - угол поворота ротора	0,25(0,07%)...1° (0,3%)
	Индикаторный режим включения 		$M_c = M_{\text{сmax}} \cdot \sin \gamma$; $\gamma = \beta - \alpha$, где M_c – синхро- низирующий момент; $M_{\text{сmax}}$ – максимальное значение M_c ; α - угол поворота ротора сельсина- датчика (СД); β - угол поворота ротора сельсина- приемника (СИ)	0,5...1,5°
	Трансформаторный режим включения 		$U_{\text{вых}} = E_{\text{тmax}} \cdot \cos \gamma$; $\gamma = \beta - \alpha$, где $E_{\text{тmax}}$ – макси- мальное эффек- тивное значение ЭДС в обмотках сельсина-транс- форматора (СТ)	0,25...0,75°
	Двухканальный транс- форматорный режим включения 		$U_{\text{го}} = E_{\text{тmax}} \cdot \sin \gamma$; $U_{\text{го}} = E_{\text{тmax}} \cdot \sin(i \cdot \gamma)$, где $U_{\text{го}}$ – выходное напряжение кана- ла грубого отсче- та; $U_{\text{го}}$ – выходное напряжение кана- ла точного отсче- та; i – передаточ- ное отношение редуктора	1...30'

1	2	3	4	5
Индукционные редуко- сины		0...360°	$U_{\text{вых}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{пmax}} \times \sin(n_p \alpha) \times \sin(\omega t + \psi),$ <p>где $U_{\text{пmax}}$ – максимальное значение выходного напряжения; n_p – передаточное отношение электрической редукции; ψ – значение начального фазового сдвига</p>	До 10''
Индукто- сины			$U_{\text{вых}} = k \cdot U \cdot \cos(\theta - \rho \alpha) \times \sin(\omega \cdot t),$ <p>где k – коэффициент трансформации; U – амплитуда напряжения питания; θ – угол, определяемый отношением амплитуд напряжений в двухфазных обмотках; ρ – число пар полюсов; α – угол между осями обмоток</p>	1,5...5''
Индук- тивные		0,1...5 мм	$I = k \cdot \delta,$ <p>где k – коэффициент пропорциональности</p>	< 0,1 %

3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ И КОНУСОВ. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

В практике измерения угловых размеров применяется широкая номенклатура методов и средств, которые можно разделить на следующие основные группы:

1. Методы и средства измерений углов, основанные на их сравнении с жесткой образцовой мерой. В качестве образца обычно применяют жесткую угловую меру. Методом сравнения определяют отклонение проверяемого угла от угла образцовой меры. К этой группе измерений относятся методы оценки размеров световой щели; измерения с помощью рычажно-механических и рычажно-оптических приборов; пневматический и припасовки по краске.

2. Методы и средства измерений координат, образующих угол, расчет угла с использованием тригонометрических функций. Угол изделия определяют косвенным методом через измерение линейных величин, а затем выполняют расчет с использованием тригонометрических функций (синуса и тангенса). К этой группе относятся: координатный метод на универсальном микроскопе, координатный метод на рычажном приборе, метод с помощью синусной линейки, с помощью тангенсной линейки, с помощью шариков, роликов и концевых мер длины.

3. Методы и средства измерений углов, основанные на их сравнении с угловой шкалой прибора. Угол изделия отсчитывают непосредственно в угловых единицах по шкале прибора. К основным методам этой группы измерений относятся методы с применением автоколлимационных труб, оптических делительных головок, оптического делительного стола, инструментального и универсального микроскопов, уровней, угломеров.

В практике измерения углов и конусов применяют также интерференционный метод, правда, ограниченно, вследствие чего в данной главе метод не рассматривается.

3.1. Методы и средства измерений углов, основанные на их сравнении с жесткой образцовой мерой

Исследования методов измерений углов с использованием одномерных угловых мер, выполненные д-ром техн. наук В. Я. Эйдиновым, дали следующие результаты.

При подгонке изделия с протяженностью контакта 10 – 200 мм к образцу без просвета предел отклонения угла измеряемого изделия от угла образцовой меры составляет $\pm(120 - 6)''$, а при измерении с помощью образца просвета – соответственно $\pm(40 - 2)''$, т. е. снижается примерно в три раза.

При измерении с помощью отсчетных устройств приборов предел погрешности измерения угольников с длиной образующей $l = 200$ мм составил $\pm 8''$, а угловых мер ($l = 70$ мм) – $\pm 10''$.

При контроле пневматическим методом предел погрешности измерений конуса Морзе № 3 составил $\pm 14''$.

При припасовке по краске предел отклонений угла измеряемого изделия от угла калибра при протяженности контакта 20 – 200 мм составил соответственно от $\pm 140''$ до $\pm 14''$.

3.1.1. Определение угла по размеру световой щели

Угловые шаблоны. На практике требуются угловые шаблоны с самыми разнообразными углами. Если в наборе угловых мер есть мера, угол которой равен требуемому углу изделия, то применяют именно эту угловую меру. Для наиболее часто измеряемых углов выпускаются специальные наборы угловых мер. Например, ГОСТ 2875-75 предусмотрен набор № 3 с номинальными размерами рабочих углов 10° ; 15° ; 20° ; 30° ; 45° ; 55° ; 60° ; $90^\circ - 90^\circ - 90^\circ - 90^\circ$. Если нет угловой меры с необходимым углом или конструкция изделия не позволяет применить угловую меру, то изготавливают специальные шаблоны.

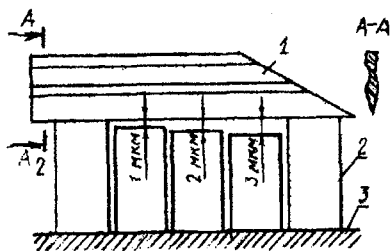


Рис. 46

При наличии просвета между угловой мерой или шаблоном и изделием его определяют путем сравнения с образцами просвета. Такой образец просвета (рис. 46) создают следующим образом. Две одинакового размера концевые меры 2 притирают к доведенной поверхности бруска 3 с широкой рабочей поверхностью. Между концевыми мерами 2 на бруске 3 притирают концевые меры, размеры которых в сочетании с лекальной линейкой 1 создадут необходимые образцы просвета (на рисунке – 1; 2 и 3 мкм). Эти просветы сравнивают «на глаз» с просветом между изде-

лием и угловой мерой или шаблоном. Если образующая угла изделия не является лезвием, а имеет некоторую ширину, то для создания одинаковых условий сравнения для образца просвета вместо лекальной линейки берут линейку, имеющую такую же ширину, как и образующая угла изделия. Изделие можно также пригонять по шаблону без просвета.

Поверочные угольники 90°. Они предназначены для проверки и разметки прямых углов, для контроля взаимного перпендикулярного расположения деталей при монтаже различных видов оборудования и для проверки точности работы станков.

Типы угольников, их размеры, технические требования к ним регламентированы ГОСТ 3749-77. Угольники типов УЛ; УЛП и УЛЦ (рис. 47) предназначены для лекальных работ, а типов УП и УШ – для слесарных. Основное различие между лекальными и слесарными угольниками заключается в том, что у первых измерительная поверхность имеет цилиндрическую форму, а у вторых – плоскую. Причем измерительные поверхности угольников типа УЛ и УЛП закруглены радиусом $r = 0,2 \pm 0,1$ мм. Это оказывает большое влияние на точность результатов измерения изделий методом на просвет: чем больше радиус, тем хуже виден просвет.

Основные размеры H и L угольников типов УЛ; УЛП; УП и УШ равны 40 – 1600 мм, а H и D угольников типа УЛЦ – 80 – 630 мм.

ГОСТ 3749-77 регламентируются угольники классов точности 0, 1 и 2. В соответствии с типом, классом точности и основными размерами угольника установлены следующие технические требования.

Отклонения от перпендикулярности измерительных поверхностей B и B к опорным поверхностям Γ и $\mathcal{Ж}$ угольников всех типов на длине H (для УЛ – на длине H и L) не должны превышать 2,5 – 90 мкм.

Отклонения от плоскостности измерительных и опорных поверхностей на длине H не должны превышать значений:

1,0 – 30,0 мкм — измерительных поверхностей B и B угольников типов УП и УШ;

1,5 – 36,0 мкм — опорных поверхностей Γ и $\mathcal{Ж}$ угольников типов УП и УШ;

1,5 – 4,0 мкм — опорных поверхностей Γ и $\mathcal{Ж}$ угольников типов УЛ и УЛП, опорной поверхности Γ угольников типа УЛП.

Плоскостность проверяют с помощью лекальной линейки с двусторонним скосом – ЛД, ребро которой принимают за прилегающую прямую.

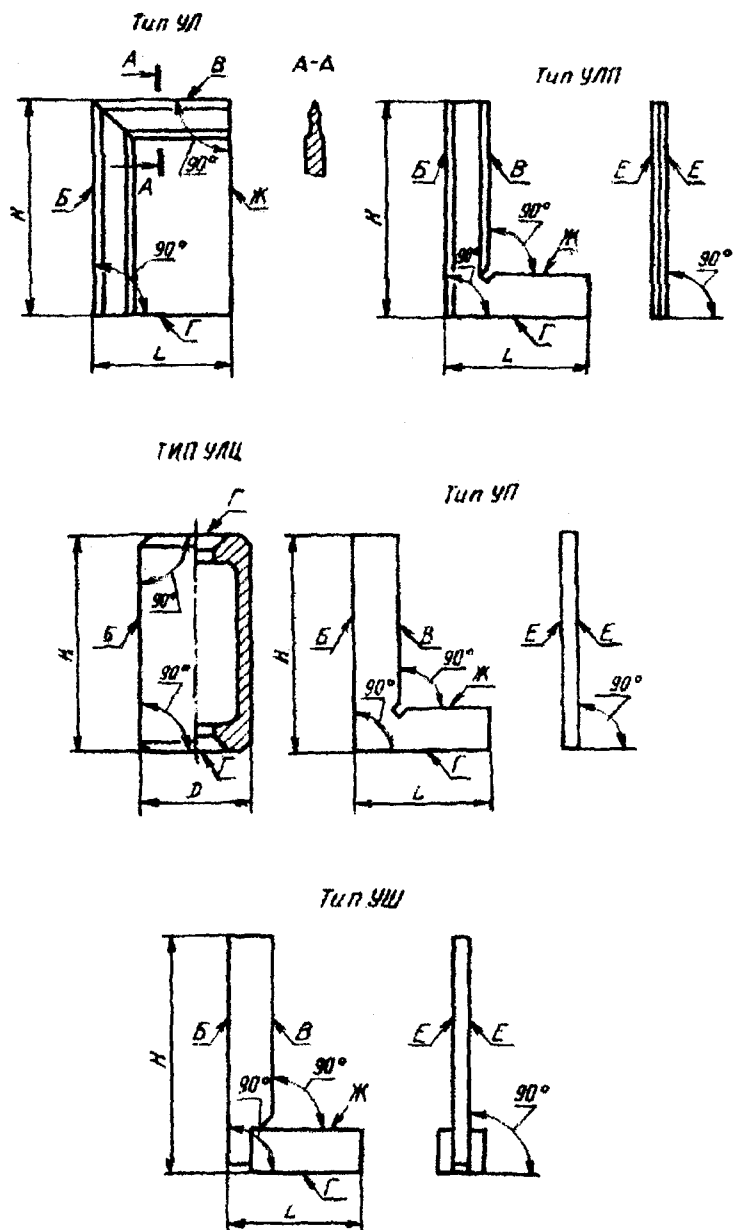


Рис. 47

Отклонения от прямолинейности измерительных поверхностей на длине H и L не должны превышать значений:

1,0 – 3,0 мкм – измерительных поверхностей B и B угольников типов УЛ и УЛП;

1,5 – 6,0 мкм – измерительных поверхностей B угольников типов УЛЦ.

Прямолинейность проверяют с помощью линейки с широкой рабочей поверхностью – ШП, плоскость которой принимают за прилегающую плоскость. При проверке плоскостности и прямолинейности ребро лекальной линейки в первом случае и ребро угольника во втором случае необходимо повернуть в плоскости опорной поверхности на $\pm 15^\circ$ от среднего положения и определить максимальный просвет.

Отклонения от параллельности опорных поверхностей Γ и $\mathcal{Ж}$ на длине H не должны превышать:

2,5 – 90,0 мкм – у угольников типов УП и УШ;

2,5 – 9,0 мкм – у угольников типов УЛ и УЛП.

Отклонения от перпендикулярности боковых поверхностей E угольников типов УП и УШ к опорной поверхности Γ не должны превышать 40 – 630 мкм. Поверку выполняют на поверочной плите класса точности 1 при помощи угольника класса точности 2.

Радиус закругления измерительных поверхностей лекальных угольников проверяют с помощью предельного шаблона.

Шероховатость измерительных и опорных поверхностей угольников должна соответствовать $Ra = 0,04 - 0,63$ мкм (по ГОСТ 2789-73). Для определения шероховатости указанных поверхностей используют щуповой профилометр-профилограф завода «Калибр». Шероховатость всех остальных поверхностей определяют сравнением с образцами шероховатости поверхности (ГОСТ 9378-75).

Метод «трех угольников». При отсутствии образцового угольника 90° его создают, применяя так называемый метод трех угольников. Берут три квадратных угольника квадрата 1; 2 и 3 (рис. 48), складывают вместе и обрабатывают доводкой у всех одновременно угол α . Затем к угольнику 2 доводкой пригоняют угольник 1 и проверяют на плите. После этого к угольнику 2 пригоняют угольник 3 и проверяют на плите. Если вначале у угольника 2 угол больший, то при проверке на плите угольника 1 по угольнику 3 обнаружится просвет. Тогда угольники 1 и 3 доводят совместно до устранения

просвета. Затем повторяют проверки и доводки в сочетаниях 1 – 2; 2 – 3; 3 – 1 и т. д. до тех пор, пока в любой комбинации просвета не будет. При пригонке угольников периодически лекальной линейкой проверяют прямолинейность и плоскостность ребер угольников. В итоге получают три образцовых угольника, которые необходимы измерительной лаборатории. Периодически угольники сверяют друг с другом.

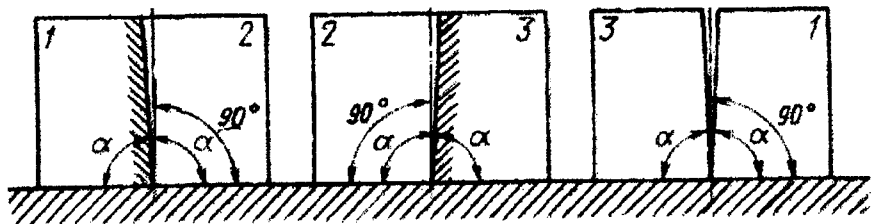


Рис. 48

Измерение угольника сравнением с образцовым угольником. Рабочие поверхности внутреннего угла проверяемого угольника совмещают с поверхностями наружного угла образцового угольника. Если угол проверяемого угольника больше 90° , просвет будет сверху. Его определяют с помощью образца просвета. Если угол проверяемого угольника меньше 90° , просвет будет внизу. Отклонения $\Delta_{\text{п}}$ от 90° у проверяемого угольника определяют с учетом погрешности Δ_o образцового угольника по формуле

$$\Delta_{\text{п}} = \Delta_o \pm l,$$

где l – максимальный просвет между угольниками.

При использовании этой формулы необходимо учитывать, на какой части длины H определяют отклонение, и сделать пересчет на полную длину H проверяемого угольника.

3.1.2. Измерение углов с помощью рычажно-механических и рычажно-оптических приборов

Проверка внешнего угла поверочного угольника 90° методом «трех угольников». На поверочной плите не ниже класса точности 1 укрепляют при помощи струбцины цилиндрический ролик из-

вестного диаметра d (рис. 49). У поверяемых трех угольников при помощи микрометра предварительно измеряют размер n на расстоянии 2 – 3 мм от свободного конца длинной стороны. Затем поверяемые угольники 1 – 3 устанавливают и закрепляют струбцинами на плите попарно в трех положениях, указанных на рисунке, после чего измеряют размеры A рычажным или гладким микрометром. Отклонения Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 сторон внешних углов угольников от взаимной перпендикулярности в миллиметрах на длине H определяют из уравнений

$$\Delta_1 = \frac{A_{1,2} - A_{2,3} + A_{1,3} - d}{2};$$

$$\Delta_2 = \frac{A_{1,2} + A_{2,3} - A_{1,3} - d}{2};$$

$$\Delta_3 = \frac{-A_{1,2} + A_{2,3} + A_{1,3} - d}{2}.$$

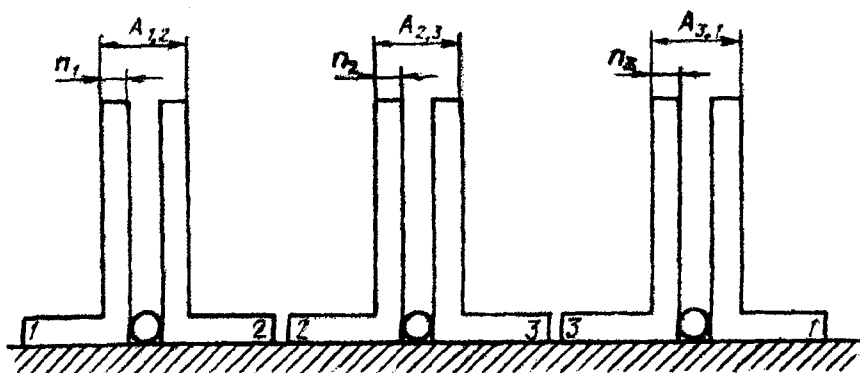


Рис. 49

Аттестация образцового угольника-квадрата. Образцовый угольник-квадрат поверяют на поверочной плите класса точности 1 с укрепленными на ней рычажно-механическим прибором с ценой деления 0,001 мм и цилиндрическим упором (рис. 50). Установку на нуль выполняют по углу α , а на остальных углах определяют отклонения от первоначальной установки.

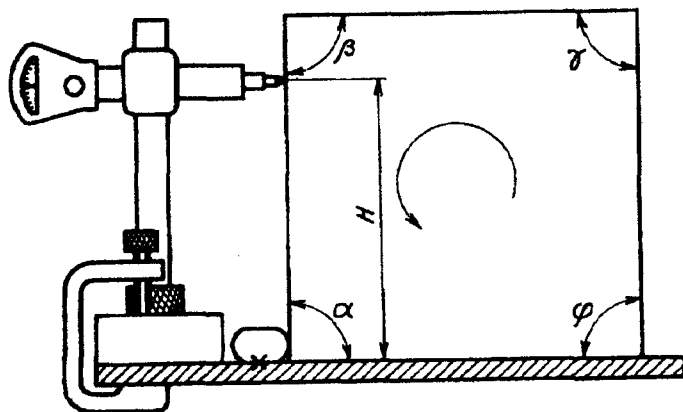


Рис. 50

Пример. Определяем отклонения углов β , γ и φ от угла α . Предположим, что эти отклонения соответственно равны 3, 2 и -2 мкм. Тогда отклонения углов β , γ и φ от 90° составят: $\delta\beta = \delta\alpha + 3$ мкм; $\delta\gamma = \delta\alpha + 2$ мкм; $\delta\varphi = \delta\alpha - 2$ мкм. Сумма углов четырехугольника $\alpha + \beta + \gamma + \varphi = 360^\circ$. Сумма отклонений всех четырех углов от 360° равна нулю, следовательно,

$$\delta\alpha + \delta\beta + \delta\gamma + \delta\varphi = 0.$$

Это равенство можно написать иначе, если подставить ранее определенные выражения для отклонений:

$$\delta\alpha + (\delta\alpha + 3) + (\delta\alpha + 2) + (\delta\alpha - 2) = 0.$$

Из этого уравнения находим, что отклонения от 90° углов составят: $\delta\alpha = -0,75$ мкм; $\delta\beta = \delta\alpha + 3 = 2,25$ мкм; $\delta\gamma = \delta\alpha + 2 = 1,25$ мкм; $\delta\varphi = \delta\alpha - 2 = -2,75$ мкм.

Измерение поверочного угольника 90° на плите с помощью рычажно-механического прибора. Применяют метод сравнения с образцовым угольником. Вначале по описанному методу (см. рис. 50) устанавливают образцовый угольник до упора и настраивают измерительный прибор на нуль. Затем вместо образцового

угольника ставят в такое же положение до упора поверяемый угольник. Отсчет по прибору покажет отклонения поверяемого внешнего угла угольника от угла образцового угольника.

Проверка угольников на установке УПУ-2. Установку применяют для определения методом непосредственной оценки отклонения от перпендикулярности наружных и внутренних углов поверочных угольников 90° .

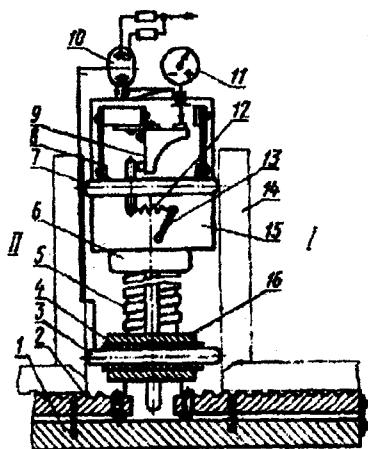


Рис. 51

На чугунной станине 1 (рис. 51) размещены два ребристых регулируемых столика 2 с доведенными рабочими поверхностями. В станине запрессована вертикальная колонка 5 с двумя диаметрально расположенными шпоночными пазами и трапецидальной резьбой. Вращением гайки 6 можно плавно регулировать положение верхней измерительной каретки 15, в которой на двух плоских пружинах 8 укреплен подвижной измерительный стержень 7.

Перемещение измерительного стержня 7 воспринимает рычажно-зубчатая головка 11 через рычаг 9, подвешенный на крестообразно расположенных плоских пружинах.

Неподвижный измерительный стержень 3 закреплен в нижней каретке 16 с помощью изолирующей втулки 4. Оба измерительных стержня не должны отличаться по длине более чем на $0,8$ мкм. Их цилиндрические поверхности имеют радиус, равный половине длины стержня, что исключает влияние их взаимного перекоса на погрешность установки.

Нижний измерительный стержень 3 электрически связан с управляющей сеткой лампы 10 типа 6Е5С, предназначенной для индикации момента контакта поверяемого угольника с неподвижным стержнем 3. При контакте поверяемого угольника 14 с измерительным стержнем 3 угольник входит в контакт и с верхним измерительным стержнем 7 и, преодолевая сопротивление пружины 12, перемещает его.

В момент контакта, когда секторы лампы 10 начинают вибрировать, снимают отсчет по головке 11. Отсчет делают дважды – в положениях I и II поверяемого угольника. При переводе угольника из положения I в II рычагом 13 переводят пружину 12 в нейтральное положение. В этом случае измерительный стержень 7 перемещается под действием только пружин головки 11 и рычага 9.

За погрешность угольника принимают полуразность отсчетов в положениях I и II.

При измерении внутренних углов нижнюю каретку 16 поднимают на соответствующую высоту и используют для проверки ее нижнюю доведенную поверхность.

При измерении угольников высотой более 400 мм установку располагают на поверочной плите. Обе каретки 15 и 16 поворачивают вокруг оси колонки 5 на 90° и закрепляют на соответствующих высотах, а поверяемый угольник базируют на поверочной плите.

Наличие в установке электронного индикатора контакта 10 позволяет стабилизировать измерительное усилие и исключить погрешности, вызванные деформациями колонки, измерительных стержней и угольников. Усилие пружины 12 вдвое превышает сумму сил головки 11 и рычага 9, поэтому в обоих положениях поверяемого угольника измерительное усилие одинаковое, равно 300 ± 10 сН.

В качестве отсчетного устройства 11 применена рычажно-зубчатая головка типа ЗИГ с ценой деления 2 мкм.

Погрешность установки ± 3 мкм.

Установка может быть использована для проверки угольников типов УП и УШ классов точности 1 и 2 высотой до 600 мм по ГОСТ 3749-77.

Проверка угловой меры на приборе КПУ-3. Проверку осуществляют

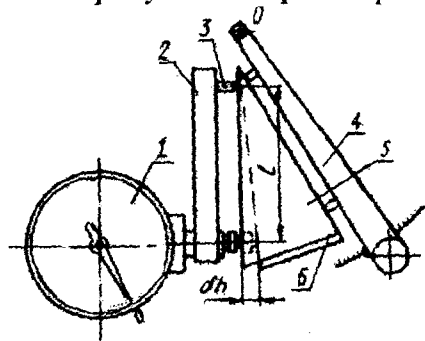


Рис. 52

методом сравнения с угловой мерой. Два шариковых упора (рис. 52) закреплены на поворотном рычаге 4, который устанавливают по специальной круговой шкале на номинальный размер угловой меры и закрепляют стопорным винтом. На измерительной планке 2 закреплены третья шариковая опора 3 и измерительная головка

ка 1. Измерительная планка 2 закреплена на плоских пружинных подвесках (на рисунке не показаны), которые обеспечивают строго параллельное перемещение планки и постоянство измерительного усилия. Образцовую меру 5 прижимают к трем шариковым опорам. После этого с помощью микроподачи устанавливают нулевое показание измерительной головки 1. Разность показаний δh измерительной головки отсчитывают после замены образцовой меры 5 поверяемой 6. Искомая разность углов $\delta\alpha$ может быть определена по формуле

$$\delta\alpha = \frac{\delta h}{l} \cdot 2,06 \cdot 10^5,$$

где $2,06 \cdot 10^5$ – постоянный коэффициент при переводе радиана в секунду (округленно – значение 206265).

Как видно из формулы и схемы, δh зависит только от $\delta\alpha$ и l и не зависит от смещения сравниваемых мер относительно опор рычага 4. Шкалу измерительной головки градуируют в угловых секундах. Приборы КПУ-3 конструкции ХГНИИМ выпускают с ценой деления $10''$ и пределами измерений $10 - 100^\circ$. Предел погрешности сравнения угловых мер с одинаковыми номинальными углами $\pm 3''$.

Измерение угловой меры на вертикальном оптиметре. В основу метода положено равенство внутренних накрест лежащих углов, образованных пересечением двух параллельных прямых третьей. Если угол исходной (образцовой) меры α_0 равен рабочему углу α_{II} притертой к ней поверяемой меры (рис. 53, а), то свободные образующие их углов параллельны между собою. Притертые две угловые меры 3 и 4 (рис. 53, а) укладывают на ребристую поверхность столика 2, укрепленного на круглом столике 1 вертикального оптиметра. На оптиметре делают отсчет в положении I блока угловых мер, затем в положении II. Разность между отсчетами даст значение δh .

Абсолютное отклонение угла поверяемой меры (в секундах) определяют по формуле

$$\delta\alpha_{II} = \frac{\delta h}{l} \cdot 2,06 \cdot 10^5 + (\pm \Delta),$$

где l – длина перемещения блока угловых мер из положения I в положение II (около 70мм);

Δ – погрешность рабочего угла аттестованной исходной (образцовой) угловой меры.

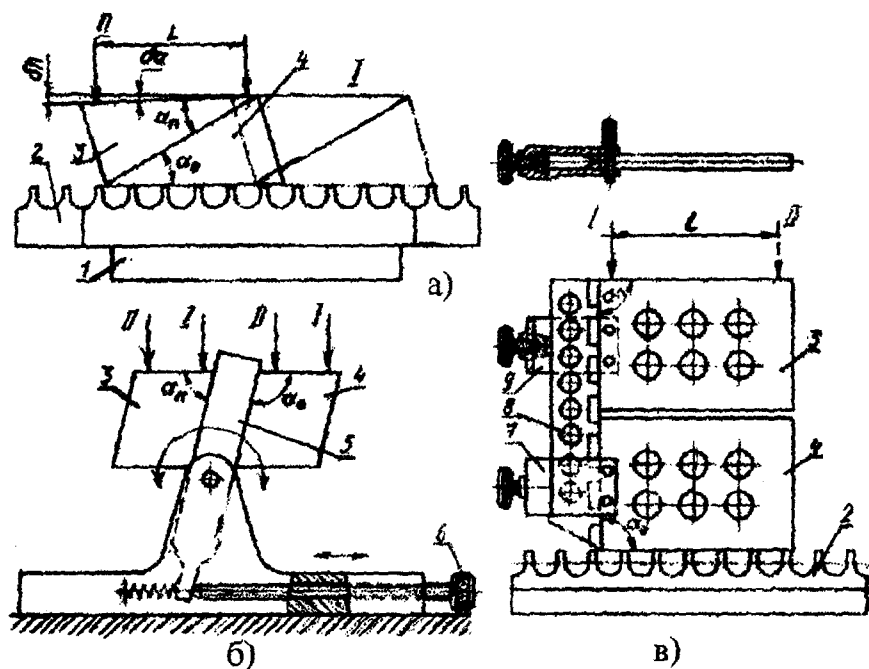


Рис. 53

Если оценивать погрешность оптиметра $\pm 0,2$ мкм и учесть, что при этом методе делают два отсчета, то после квадратичного суммирования погрешность прибора составит 0,00056 мм. Тогда погрешность метода измерения без учета погрешности аттестации образцовой угловой меры

$$\delta\alpha_n = \frac{0,00056}{70} \cdot 206265 = \pm 1,6'' . \quad (4)$$

С учетом погрешности аттестации образцовой меры (от $\pm 3''$ до $\pm 4''$) погрешность метода составит около $\pm 5''$.

На рис. 53, б изображена схема измерений на вертикальном оптиметре угловой меры с четырьмя рабочими углами на специальном

приспособлении. Боковые стороны планки 5, к которым прикрепляют угловые меры, должны быть параллельными. Регулируя винтом 6, устанавливают планку в такое положение, когда оптиметр даст одинаковые показания в положениях I и II по образцовой угловой мере 4. Тогда, если угол α_{II} является дополнением к углу 180° , оптиметр должен давать одинаковые показания в положениях I и II по поверяемой угловой мере 3. В противном случае разность показаний укажет на погрешность угла α_{II} , которую можно подсчитать по формуле (4). Погрешность метода составляет $\pm 10''$.

Четырехугольные меры можно поверять также с помощью специальной линейки 8 (рис. 53, в) и державок 7 и 9. Поверку всех углов четырехугольных мер выполняют по длинной стороне меры. Образцовую угловую меру 4 короткой стороной, образующей угол α_0 , крепят державкой 7 к рабочей поверхности специальной линейки 8. К этой же линейке на расстоянии 0,5 - 1 мм от образцовой меры крепят державкой 9 поверяемую угловую меру 3 также короткой стороной, образующей угол $\alpha_{II} = 180^\circ - \alpha_0$. При сборке блока угловых мер следует следить за тем, чтобы обе угловые меры находились примерно в одной плоскости. Для этого собранный блок нерабочими сторонами укладывают на плоский брусок и в таком положении каждую меру слегка прижимают крепежными винтами державок к линейке, после этого брусок удаляют, а меры жестко крепят указанными винтами. Собранный блок устанавливают на ребристый столик 2 вертикального оптиметра и определяют продольную непараллельность блока, как при проверке угловых мер с одним аттестованным углом.

3.1.3. Пневматический метод контроля конусов

Метод заключается в том, что на определенной длине l пневматическим методом измеряют два диаметра - в двух сечениях. На рис. 54, а дана измерительная головка для внутренних измерений, а на рис. 54, б — для наружных измерений конусов. Каждая измерительная головка имеет независимые друг от друга сопла на расстоянии l : по два сопла для внутренних измерений и по одному для наружных измерений. Каждые два (или одно) сопла связаны с независимыми друг от друга, но расположенными в одной плоскости отсчетными устройствами пневматического прибора с водяным манометром.

Измерение сводится к определению разности уровней жидкости в обоих отсчетных устройствах. Измерение выполняют методом сравнения с образцами — конусной втулкой 1 или конусной пробкой 2.

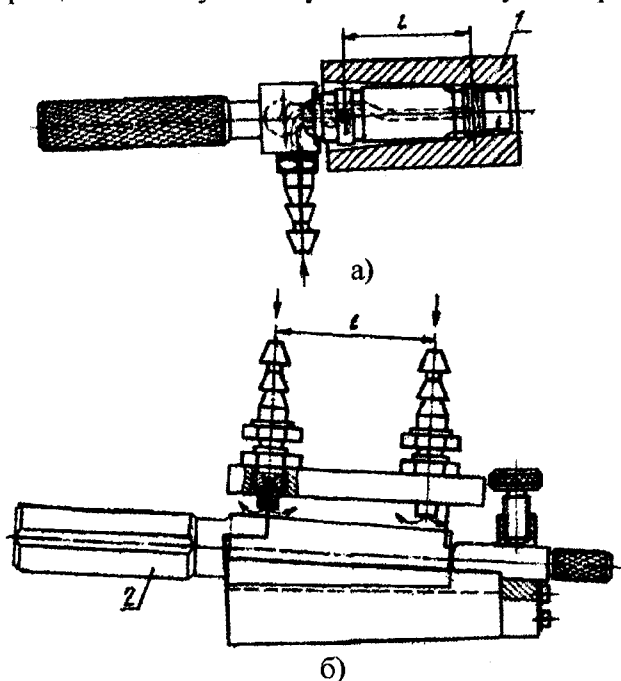


Рис. 54

3.1.4. Контроль конусов методом припасовки по краске

Метод применяют при проверке конусов. Конусный калибр-пробку, являющуюся образцовой мерой, покрывают тонким слоем краски, разбавленной машинным маслом, и вводят в проверяемое отверстие. После поворота пробки выступающие части поверхности отверстия окрасятся. По равномерности окраски можно судить о точности конуса отверстия.

Для конусного отверстия необходимо также проверить его осевое смещение, о чем можно судить по размерам одного из диаметров на торцах изделия. Для этого на образцовом калибре-пробке делают две кольцевые риски — допускаемые предельные размеры большого диаметра на торце изделия. Изделие признают годным, если большой

диаметр торца изделия лежит между двумя кольцевыми рисками. Аналогичным методом проверяют наружные конусы изделий.

3.2. Методы и средства измерения координат, образующих угол, и расчет угла с использованием тригонометрических функций

Практически эти методы сводятся к измерению линейных величин и расчету искомого угла с использованием функций синуса и тангенса.

3.2.1. Координатный метод измерений наружного конуса на универсальном микроскопе

На универсальном микроскопе с применением прямых ножей 1 - 4 (рис. 55) измеряют размеры d , D и l .

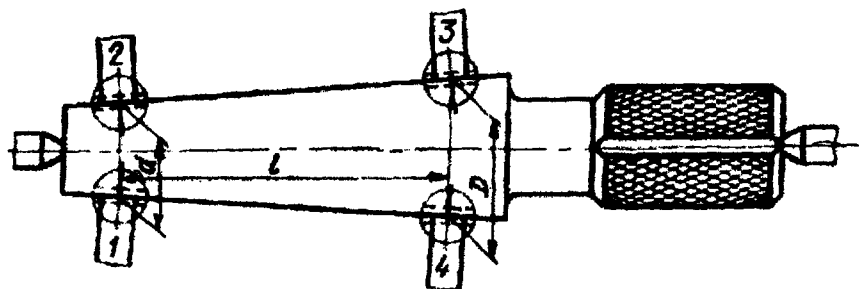


Рис. 55

Метод построен по тангенсной схеме измерений. Погрешность измерений уменьшается с увеличением угла измерения. Например, при образующих длиной 10 - 200 мм погрешности измерений колеблются в пределах $\pm(130 - 7)''$ при измерений углов 0 - 45° и $\pm(100 - 5)''$ при измерении углов свыше 45 - 90°.

3.2.2. Координатный метод измерений наружного конуса на рычажном приборе

Измерение сводится к определению размеров D и d (рис. 56, а) при положениях I и II каретки. При определении размера делают три отсчета по линейке с ценой деления 1 мм, микрометрическому

винту ($s = 0,1$ мм) и рычажно-зубчатой головке ($s = 0,001$ мм). Положения I и II устанавливают по двум блокам концевых мер, разность между размерами которых равна l .

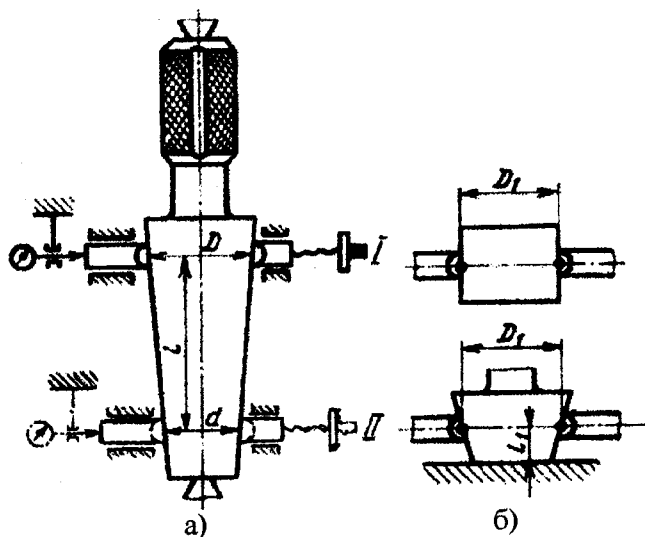


Рис. 56

Измерительные наконечники рычажного прибора представляют собой половины цилиндров, помещенных в цилиндрических углублениях стержней, и могут в них вращаться вокруг оси цилиндра. Благодаря этому расстояние между измерительными поверхностями наконечников может быть установлено по концевым мерам длины. Это используют также в том случае, когда необходимо измерить диаметр D_1 конуса (рис. 56, б) на расстоянии l_1 от торца. В этом случае для установки прибора на нуль берут блок концевых мер длины, равный D_1 .

Предельная погрешность измерений при длине образующей конуса от 30 до 200 мм колеблется в пределах соответственно $\pm (20-3)''$ при измерении углов $0-45^\circ$ и $\pm(15-2)''$ при измерении углов свыше $45-90^\circ$.

3.2.3. Измерение углов синусной линейкой

Синусные линейки применяют для измерения углов при лекальных работах или для установки изделий на определенный угол перед обработкой.

Конструкции синусных линеек, основные размеры и технические требования регламентируются ГОСТ 4046-80. На рис. 57 изображены конструкции синусной линейки трех типов: ЛС – без опорной плиты с одним наклоном, ЛСО – с опорной плитой с одним наклоном; ЛСД – с опорной плитой с двумя наклонами. Детали линеек: 1 – столик; 2 – ролики; 3 – боковые планки; 4 – упорная планка; 5 – опорная плита; 6 – крышки; 7 – средняя плита. Основным размером синусной линейки является расстояние L между осями роликов 2.

Синусные линейки предназначены для измерения наружных углов от 0 до 45° . Их изготавливают с расстоянием между осями роликов от 100 до 500 мм, классов точности 1 и 2. Класс точности определяется допускаемой погрешностью (от $\pm 4''$ до $\pm 15''$) линеек при установке их угла до 45° .

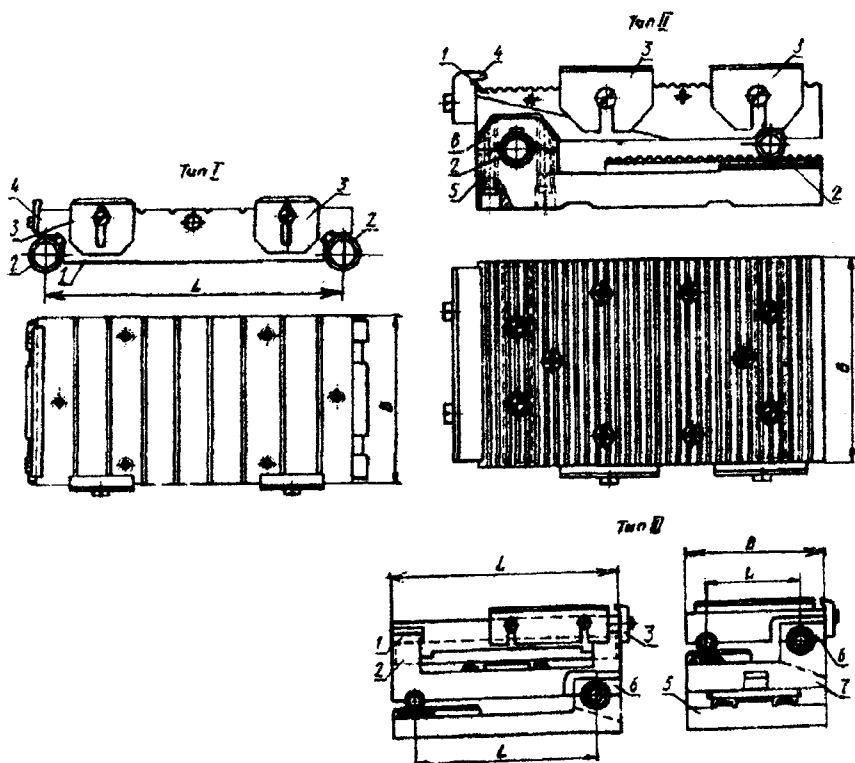


Рис. 57

При изготовлении синусной линейки необходимо выдерживать в определенных пределах следующие основные параметры и характеристики: расстояние между осями роликов; параллельность осей роликов на их длине; диаметры парных роликов; правильную геометрическую форму рабочей поверхности роликов; параллельность рабочей поверхности столика и плоскости, касательной к нижней образующей роликов; параллельность верхней (рабочей) и нижней плоскостей опорной плиты. Шероховатость рабочих поверхностей столика и опорных плит на базовой длине 0,25 мм не должна быть $Ra \leq 0,08$ мкм, а у рабочих поверхностей роликов $Ra \leq 0,04$ мкм (по ГОСТ 2789-73). Нормируются и другие размеры синусных линейек.

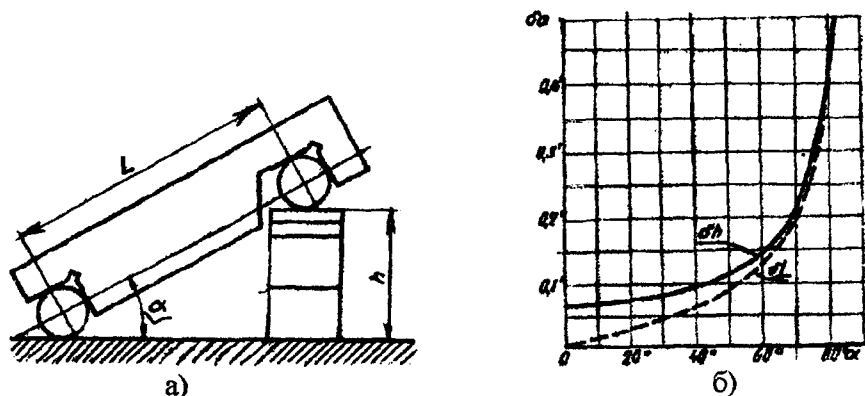


Рис. 58

Средства и методы поверки синусных линейек определены ГОСТ 8.165-75. На рис. 58,а изображена схема установки синусной линейки на угол α . Основная формула настройки синусной линейки

$$\sin \alpha = \frac{h}{L}, \quad (5)$$

где h – размер блока концевых мер;

L – расстояние между осями роликов.

Влияние погрешностей отдельных элементов синусной линейки на угол ее установки можно определить, продифференцировав равенство (5). После преобразования получим

$$d\alpha = \frac{\sec \alpha}{L} \cdot dh - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{L} \cdot dL,$$

здесь L выражена в радианах.

Погрешность установки синусной линейки резко возрастает при углах свыше 45° . Это видно из рис. 58, б. Поэтому допускаемые погрешности угла установки синусной линейки даются в ГОСТ 4046-80 при установке ее на углы до 45° . Следовательно, на синусной линейке целесообразно измерять углы до 45° , а на универсальном микроскопе – углы свыше 45° .

Пример. Если $\alpha = 30^\circ$, $L = 100 \pm 0,003$ мм, цена деления отсчетного прибора $s = 0,002$ мм, размер блока концевых мер длины 5-го разряда $h = 50$ мм, то предельная погрешность измерения на синусной линейке составит около $8''$.

Синусную линейку широко применяют для измерений наружных конусов (рис. 59). Отклонение угла конуса $\delta 2\alpha$ (в угловых секундах) от номинального размера определяют исходя из разности показаний δh в мм отсчетного устройства в точках 1 и 2, отстоящих на расстояние L , мм, по формуле

$$\delta 2\alpha = \frac{\delta h}{L} \cdot 2,06 \cdot 10^5.$$

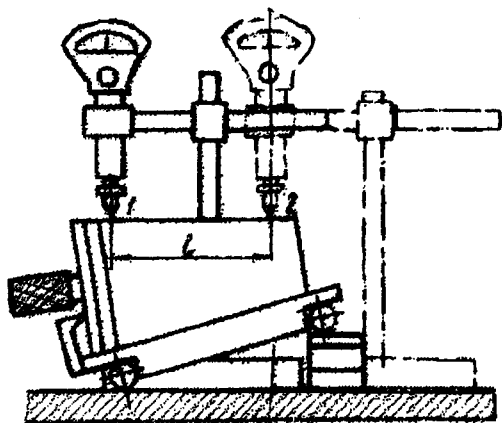


Рис. 59

На результаты измерения данным методом влияют отклонения поверхности стола. Для этого в последних конструкциях приборов для измерения конусов конус закрепляют в центрах.

При отсутствии аттестованного набора угловых мер их можно поверить с помощью синусной линейки, концевых мер длины и оптиметра. Последовательность такой поверки показана на рис. 60. В данном случае применен так называемый метод калибровки.

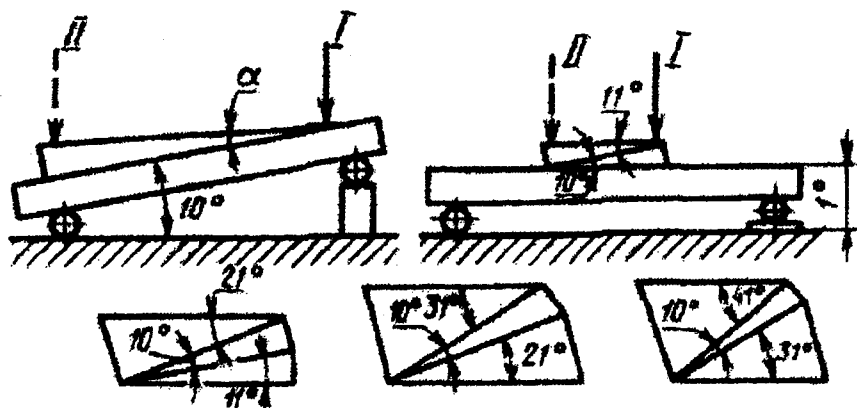
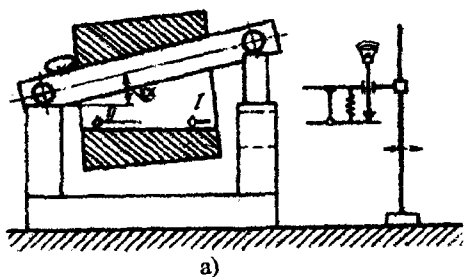


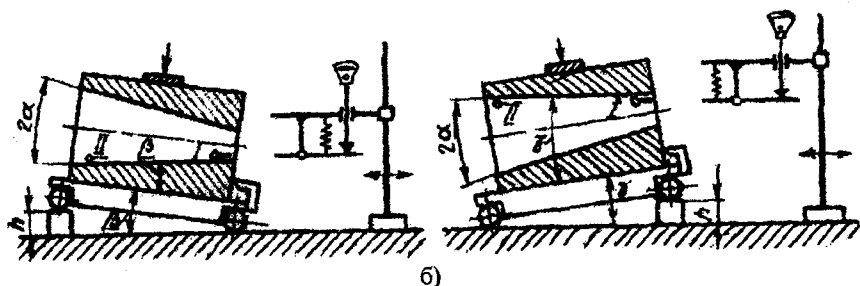
Рис. 60

Внутренний конус можно измерять с помощью синусной линейки двумя методами. В одном случае за базу измерений принимают образующую измеряемого конуса (рис. 61, а), а в другом – образующую наружного накатанного цилиндра (рис. 61, б).

Второй метод является более универсальным и более точным, что объясняется следующим. При первом методе измеряют сразу угол 2α , а при втором – углы β и γ , а искомый угол 2α получают из равенства $2\alpha = \beta + \gamma$. Таким образом, при втором методе измеряют меньшие углы, когда синусная линейка дает более точные показания. Кроме того, второй метод с базированием по наружному накатанному цилиндру не требует дополнительных специальных приспособлений, необходимых при первом методе, может быть осуществлен с помощью обычных универсальных средств измерений, имеющихся в измерительной лаборатории: поверочной плиты, синусной линейки, концевых мер длины и рычажно-механического прибора в универсальной стойке.



a)



б)

Рис. 61

3.2.4. Измерение углов тангенсной линейкой

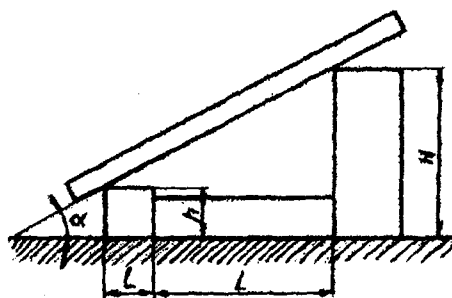


Рис. 62

Простейшая схема тангенсной линейки, составленной из плоскопараллельных концевых мер длины, показана на рис. 62. Угол установки линейки α определяют по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H-h}{L+l}. \quad (6)$$

Анализ формулы (6) показывает, что при построении малых углов α необходимо стремиться к повышению точности определения разности $H-h$, а при больших углах α – к повышению точности определения суммы $L+l$. Погрешность при самых благоприятных условиях может быть 4". Практически она значительно больше, так

как концевые меры длины имеют на ребрах закругления. Погрешность увеличивается, если эти закругления неодинаковы. Повышенные требования к точности изготовления отдельных элементов тангенсных линеек являются причиной их более редкого применения по сравнению с синусными. Примеры использования схемы тангенсных линеек приведены при описании уровней и их поверки.

3.2.5. Измерение конусов с помощью шариков, роликов и концевых мер длины

На рис. 63, а изображена схема измерения угла α внутреннего конуса 2 с помощью шариков 1 и 3. Измерительным прибором определяют размер L как разность между отсчетами при установках измерительной поверхности наконечника прибора на верхних точках обоих шариков.

$$\sin \alpha = \frac{D - d}{2L - D - d}. \quad (7)$$

На рис. 63, б дана схема измерений угла α наружного конуса 5 с помощью роликов 4 и концевых мер длины 6. Вначале измеряют размер l , затем ролики 4 (одинакового диаметра) с помощью двух блоков концевых мер 6 (одинакового размера) поднимают на высоту h и измеряют L .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{L - l}{2h}. \quad (8)$$

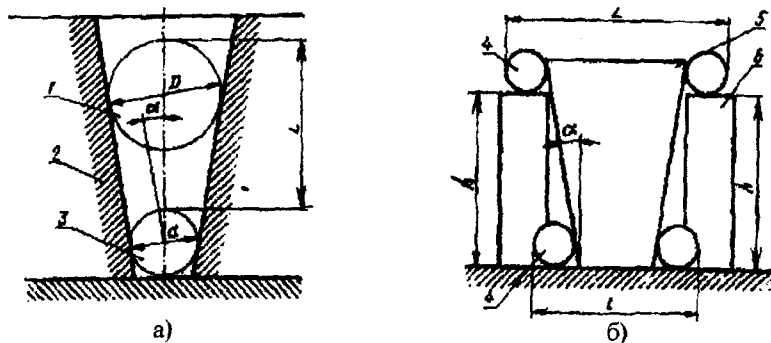


Рис. 63

Погрешность измерений в обоих случаях будет в большой степени зависеть от того, с какой точностью определяют размеры, входящие в формулы (7) и (8).

3.3. Методы и средства измерений углов, основанные на их сравнении с угловой шкалой прибора

3.3.1. Характеристика метода и его основные погрешности

Метод сводится к тому, что измеряемый угол сравнивают с круговой шкалой прибора. Круговые шкалы, встраиваемые в прибор, – это многозначные угловые меры, представляющие собой стеклянный или металлический круг, равномерно разделенный штрихами на ряд равных углов (как правило, цена деления 1°). В этом случае результат измерения отсчитывают непосредственно в угловых единицах.

Мера, имеющая замкнутую угломерную шкалу, называется лимбом. Штрихи круговой шкалы могут быть нанесены на торцевой либо на конической или цилиндрической поверхности лимба. Основными метрологическими характеристиками лимба являются: цена деления – значение угла между двумя соседними штрихами – и погрешности значений углов между двумя любыми штрихами или двумя любыми линиями, проходящими через центр шкалы и соединяющими два противоположных, расположенных друг от друга на 180° штриха.

Погрешности шкалы входят в результаты измерения непосредственно в качестве систематической погрешности.

Существенное влияние на результат измерения может оказать систематическая погрешность, вызванная наличием эксцентриситета – расстоянием между осью вращения и центром круговой шкалы. Эта погрешность непостоянна, она зависит от угла поворота лимба или отсчетного устройства, эксцентриситета и радиуса лимба.

Определим математическую зависимость погрешности угла поворота круговой шкалы (лимба) от эксцентриситета. Рассмотрим случай, когда центр O лимба и ось его вращения O_1 лежат на диаметре AB окружности, на которой нанесена круговая шкала (рис. 64, а). При повороте лимба на угол φ ($\angle AO_1B$) линия AO_1 станет в положение BO_1 ; отсчет снимают в точке B . Если бы эксцентриситет e был равен нулю, то при повороте лимба на угол φ линия AO заняла бы положение GO и отсчет снимали бы в точке G . Следовательно, при наличии эксцентриситета e погрешность выразится углом BOG , т. е. $\delta\varphi$.

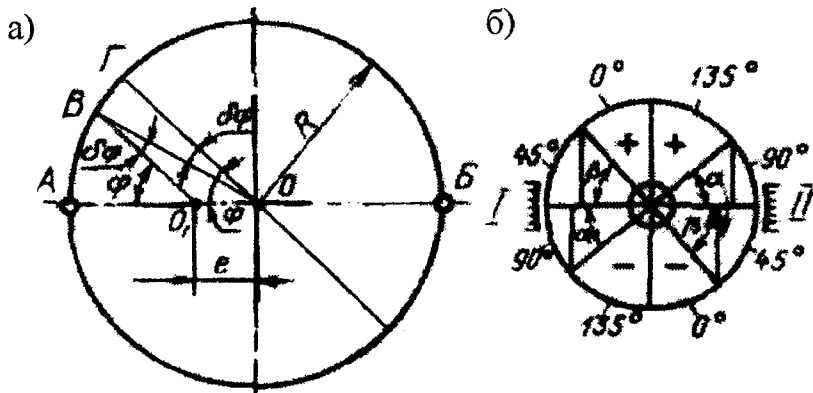


Рис. 64

На основании теоремы синусов из треугольника O_1BO следует, что

$$\frac{e}{R} = \frac{\sin \delta\varphi}{\sin(180^\circ - \varphi)} = \frac{\sin \delta\varphi}{\sin \varphi}.$$

Учитывая малость угла $\delta\varphi$, можно написать

$$\delta\varphi = \frac{e}{R} \cdot \sin \varphi. \quad (9)$$

Из формулы (9) видно, что погрешность $\delta\varphi$ из-за эксцентриситета прямо пропорциональна эксцентриситету e и синусу угла поворота лимба и обратно пропорциональна радиусу R лимба.

Практически полностью устранить эксцентриситет невозможно, а чрезмерно увеличивать радиус лимба нельзя, так как это вызывает увеличение габаритных размеров прибора. Необходимо учесть, что через 180° синус меняет знак. Это означает, что если после поворота лимба на угол φ сделать на нем два отсчета на участках, отстоящих друг от друга на 180° , то в оба отсчета войдет погрешность $\delta\varphi$, одна и та же по абсолютной величине, но имеющая разные знаки. Если затем определить среднее арифметическое из этих отсчетов, то из результата измерений $\delta\varphi$ будет автоматически исключена.

Для облегчения отсчета круговую шкалу градуируют так, чтобы оба отсчета имели одинаковое число градусов (рис. 64, б). Для этой же цели через систему призм и линз совмещают в одно поле зрения оба участка отсчета.

3.3.2. Измерение углов с помощью автоколлимационных труб

Автоколлимационные трубы – автоколлиматоры – используют в специальных измерительных установках для измерения углов, калибровки многогранников, поверки оптических делительных головок, поверки плоскостности и взаимного расположения поверхностей и т. п. Кроме того, автоколлимационные трубы вводят в конструкции таких приборов, как гониометры, АКУ и т. д.

Отечественная промышленность выпускает автоколлиматоры следующих моделей: АК-05; АК-0,25 т; АКТ-250; АКТ-1000; АКМ-1000; АФ-2, а также унифицированные АК-0,2У; АК-0,5У; АК-1У.

Все автоколлиматоры построены по одной принципиальной схеме и отличаются своими характеристиками (ценой деления шкал, фокусным расстоянием объектива, полем зрения, увеличением, пределом разрешения и др.). Особенностью фотоэлектрического автоколлиматора АФ-2 является фотоэлектрическая регистрация момента точного совмещения изображения штриха сетки с центром колеблющейся щели отсчетного устройства.

Автоколлиматор АКМ-1000. Это оптический измерительный прибор для точных угловых измерений. Прибор может быть использован для проверки направляющих длиной до 30 м и для других измерительных работ.

Основные метрологические характеристики: фокусное расстояние объектива 1000 мм; предел разрешения не более 3"; цена деления точной шкалы в поле зрения автоколлиматора 0,25"; цена одного деления грубой шкалы в поле зрения автоколлиматора 15".

Оптическая схема прибора показана на рис. 65 (измеряется прямолинейность направляющих 14). Пучок лучей от источника света 1, пройдя конденсор 2 и отразившись под углом 90° от зеркала 3, пройдет светофильтр 4, попадет на автоколлимационную марку 5. Лампочка накаливания 1 помещена в фокусе конденсора 2, поэтому лучи из конденсора выходят параллельным потоком, освещая всю марку. Марка представляет собой пластинку, на которой выгравированы два штриха, образующие биссектор.

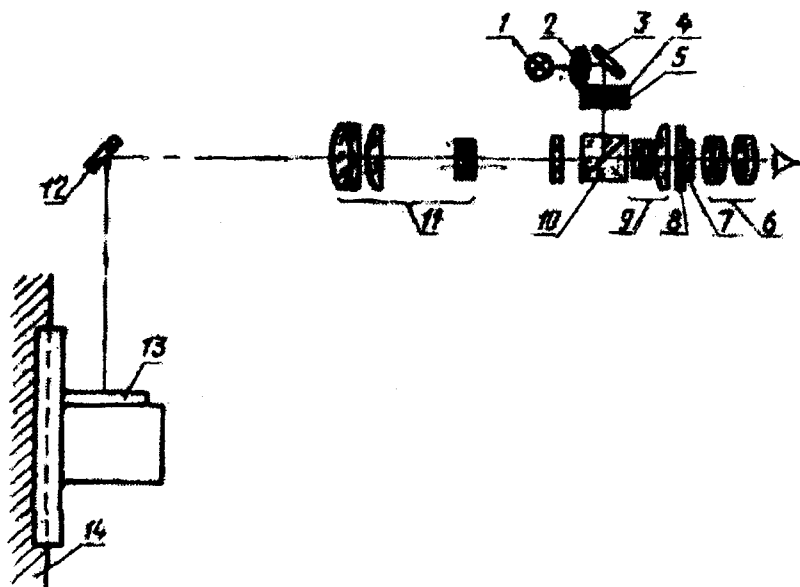


Рис. 65

Пройдя марку 5, поток параллельных лучей направляется на призму-куб 10, склеенную из двух прямоугольных призм. В плоскости склейки нанесен слой, отражающий 41 % света. Развернутое расстояние от автоколлимационной марки 5 до объектива 11 равно фокусному расстоянию последнего, поэтому лучи выходят из объектива параллельными и после поворота зеркалом 12, отразившись от фиксированной поверхности 13, собираются объективом 11 в его фокальной плоскости, пройдя сквозь призму-куб с ослаблением 41 % по направлению к окуляру 6.

В фокальной плоскости объектива помещен окуляр-микrometer, включающий линзы компенсатора 9, секундную шкалу 8 и минутную шкалу 7.

Оптическим окуляр-микрометром фиксируется смещение изображения светящейся марки.

Измерение угловой меры на гониометре. Рассмотрим схему измерений угла α угловой меры 7 (рис. 66). Две трубы 3 и 4 с главным фокусным расстоянием F установлены так, что угол между главными оптическими осями их объективов равен φ . Лимб 6 с нанесенной

на нем круговой шкалой может поворачиваться вокруг оси O . Отсчетные устройства I и II могут быть конструктивно оформлены в виде нониуса или микроскопа с окулярным винтовым микрометром.

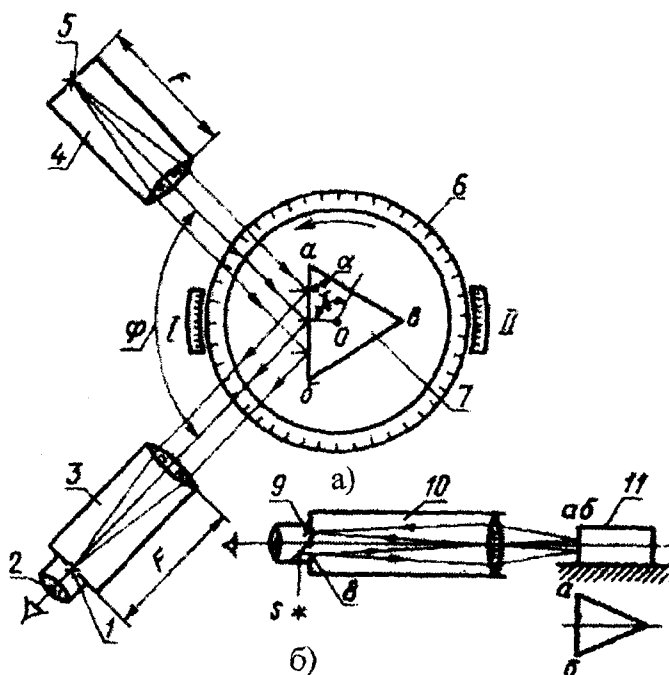


Рис. 66

Измеряемую угловую меру 7 укрепляют на лимбе 6 так, чтобы ребро измеряемого двугранного угла было параллельно оси вращения лимба O . В фокальной плоскости коллиматора 4 помещают крестообразную щель 5, освещаемую источником света. Расходящийся от крестообразной щели 5 поток лучей, преломившись в объективе, выйдет пучком параллельных лучей, которые, отразившись от доведенной поверхности ab угловой меры, пройдут через объектив автоколлимационной трубы 3 и, преломившись в нем, сойдутся в фокальной плоскости автоколлимационной трубы, передавая изображение крестообразной щели коллиматора 4. В фокальной плоскости автоколлимационной трубы 3 помещено стекло с изображе-

нием креста 1, являющееся экраном, воспринимающим действительное изображение крестообразной щели 5 коллиматора 4.

В поле зрения наблюдатель видит через окуляр 2 совмещенные крест 1 и изображение крестообразной щели 5. В таком положении делают первый отсчет по устройствам I и II. Затем лимб 6 вместе с угловой мерой 7 поворачивают против часовой стрелки до появления в поле зрения изображения крестообразной щели 5, совмещенного с крестом 1, после чего на круговой шкале делают второй отсчет по устройствам I и II. Разности между первыми и вторыми отсчетами определяют углы γ_I и γ_{II} . По среднему арифметическому $(\gamma_I + \gamma_{II}) / 2$ находят угол γ поворота лимба 6 с угловой мерой 7. Искомый угол $\alpha = 180^\circ - \gamma$.

Угол α можно измерить на приборе типа гониометра с одной автоколлимационной трубой 10 (рис. 66). В этом случае отражающую плоскость *аб* объекта измерений 11 устанавливают перпендикулярно к главной оптической оси объектива автоколлимационной трубы 10. Щель 8 расположена в фокальной плоскости, но не на главной оптической оси, а на некотором расстоянии ниже ее. Изображение световой щели появляется также в фокальной плоскости, но выше главной оптической оси на том же расстоянии.

Наблюдатель через окуляр видит совмещенные крест 9 и изображение крестообразной щели 8 в верхней половине поля зрения.

Нижняя половина поля зрения заэкранирована. Щель может быть крестообразной или прямоугольной формы, причем ширину щели можно регулировать с помощью микровинта. Крестообразные линии или одну линию наносят на стекло либо в фокальную плоскость вводят натянутые нити.

Предельная допускаемая погрешность при измерении угла одним приемом зависит от типа применяемого гониометра, она колеблется в пределах 1-5''.

Гониометры-спектрометры предназначены для измерений двугранных углов между плоскими полированными гранями твердых прозрачных и непрозрачных тел, способными отражать световые лучи, а также для спектрометрических измерений. В ГОСТ 10021-74 даны нормы изготовления гониометров типов ГС1, ГС2, Г3 и Г5. Цифра в обозначении указывает допускаемую погрешность измерения, выраженную в угловых секундах. За допускаемую погрешность измерения принимают наибольшую погрешность измерения

угла в один прием на любом участке лимба. За отсчет при одном приеме принимают среднее арифметическое из отсчетов при трех наведениях на каждую грань.

На рис. 67 показана конструкция гониометра. На основании 4, выполненном в виде треножника с тремя винтами для установки прибора по уровню, укреплен колонка с коллиматором 5 и вертикальная ось 2, на которой установлены вращающаяся алидада 3 с отсчетным микроскопом и стеклянный лимб 1.

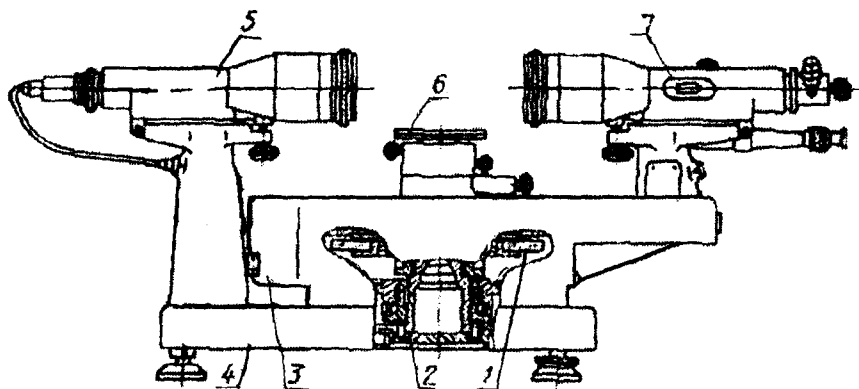


Рис. 67

На алидаде 3 укреплены зрительная труба 7 и отсчетный микроскоп. Алидаду можно вращать от руки вокруг вертикальной оси 2 и фиксировать стопорным винтом в определенном положении, которое затем уточняют с помощью микрометрического винта. Таким же образом можно вращать стол 6. Возможность одновременно наблюдать два отсчета достигается тем, что через стеклянный лимб в двух диаметрально расположенных местах проходит луч света, идущий от одного источника. Совмещение в одном поле зрения двух отсчетов позволяет повысить производительность измерения.

Методы и средства поверки гониометров установлены ГОСТ 8.266-77. Погрешность гониометров определяют с помощью многогранных призм или методом калибровки с применением вспомогательного угла, составленного из угловых мер.

3.3.3. Воспроизведение единицы плоского угла методом калибровки

Государственный эталон единицы плоского угла состоит из комплекса следующих средств измерений: 36-гранной кварцевой призмы с посеребрёнными гранями; эталонной угломерной автоколлимационной установки, состоящей из фотоэлектрических автоколлиматоров с электронным цифровым отсчетным устройством и устройства для установки и поворота многогранной призмы.

Калибровку выполняют с помощью двух автоколлиматоров (рис. 68), расположенных так, чтобы их оптические оси были перпендикулярны к отражающим граням призмы, а угол между этими осями был равен значению центрального угла γ_1 . Этот угол в процессе всей калибровки остается неизменным. Автоколлиматор 1 устанавливают на нулевой отсчет, и этот отсчет должен оставаться неизменным весь цикл измерений, в течение которого против автоколлиматора 1 ставят поочередно все грани многогранника. Автоколлиматор 2 устанавливают на нулевой отсчет только для угла γ_1 . Затем, после поворота призмы до нулевого отсчета по автоколлиматору 1 с каждой следующей гранью, с помощью автоколлиматора 2 отсчитывают отклонения углов $\Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_i$ от первоначальной установки на нуль по углу γ_1 .

В основу расчета, выполняемого с целью определения углов $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i$, кладут два положения:

сумма центральных углов многогранника равна 360° , т.е.

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_i = 360^\circ; \quad (10)$$

сумма отклонений центральных углов от номинального значения равна нулю:

$$\sum_1^i \delta\gamma = 0, \quad (11)$$

а каждое отклонение угла $\gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_i$ от номинального составит

$$\begin{aligned}
\delta\gamma_2 &= \delta\gamma_1 + (\pm \Delta_2); \\
\delta\gamma_3 &= \delta\gamma_1 + (\pm \Delta_3); \\
&\dots\dots\dots \\
\delta\gamma_i &= \delta\gamma_1 + (\pm \Delta_i).
\end{aligned}
\tag{12}$$

На основании формулы (11) составляем равенство

$$\delta\gamma_1 + [\delta\gamma_1 + (\pm \Delta_2)] + \dots + [\delta\gamma_1 + (\pm \Delta_i)] = 0
\tag{13}$$

и определяем $\delta\gamma_1$. После чего по формулам (12) определяем отклонения $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i$, а затем и углы $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i$. Зная эти углы, можно определить углы $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ и по формуле

$$\alpha = 180^\circ - \gamma.
\tag{14}$$

Отклонения от номинального значения центральных углов между любыми гранями 36-гранной призмы Государственного эталона единицы плоского угла не превышает $\pm 6''$, отклонение от плоскостности измерительных поверхностей – не более 0,05 мкм, от плоскостности основания и верхней поверхности – не более 1 мкм (вогнутость); отклонение от перпендикулярности измерительных поверхностей к основанию и пирамидальность не более $\pm 5''$; отклонение от параллельности основания и верхней поверхности не более 1 мкм. Шероховатость измерительных поверхностей не более $Rz = 0,032 - 0,050$ мкм.

Цена деления отсчетного устройства автоколлиматора не превышает $0,02''$. Среднее квадратическое отклонение результата измерения цены деления не более $0,005''$. Электронное цифровое устройство позволяет выполнять измерения в пределах от $-6''$ до $+6''$. Государственный первичный эталон единицы плоского угла обеспечивает воспроизведение единицы со средним квадратическим отклонением результата $S_0 = 0,2''$ при неисключенной систематической погрешности не более $0,02''$.

3.3.4. Установка для измерений углов с помощью автоколлимационной трубки оптиметра

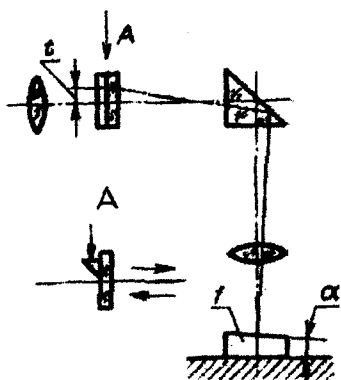


Рис. 69

Для этой установки берут обычную трубку оптиметра, но предварительно из нее вынимают узел с зеркалом и измерительным стержнем. В данном случае зеркалом служит верхняя доведенная поверхность детали 1, у которой измеряют угол α (рис. 69). Углу α соответствует перемещение изображения шкалы трубки оптиметра относительно указателя на t . Отсчет снимают, как в обычной трубке оптиметра, но цена деления будет равна не 0,001 мм, а $\sim 40''$.

Измерение угловых мер на автоколлиматоре АКУ. Основным узлом прибора является автоколлимационная трубка. Лучи света от источника (рис. 70) проходят через призму 1, на поверхность 6 которой нанесен установочный штрих 10. Штрих находится в фокальной плоскости объектива 5. После призмы 1 лучи проходят через плоскопараллельную стеклянную пластину 6 с нанесенным на ее поверхности визирным крестом 9, также находящимся на фокальной плоскости объектива 5. Пройдя через объектив 5 и преломившись в нем, лучи упадут на боковые поверхности образцовой 2 и поверяемой 4 мер, установленных на поворотном столике 3. Отразившись от измерительных поверхностей угловых мер, лучи пройдут обратно через объектив 5, преломятся в нем и дадут на поверхности визирного креста 9 изображение штриха 10. Если угловые меры имеют неодинаковые рабочие углы и их измерительные поверхности, от которых отражаются лучи, не параллельны друг другу, то в поле зрения через окуляр 8 наблюдатель увидит визирный крест 9 и два изображения установочного штриха 10, отразившегося от каждой измерительной поверхности угловых мер. Расстояние между двумя изображениями, отсчитанное с помощью окулярного винтового микрометра 7, показывает отклонение угла поверяемой меры 4 от угла образцовой меры 2. Фокусное расстояние прибора $F = 500$ мм. Предел погрешности $\pm 0,5''$.

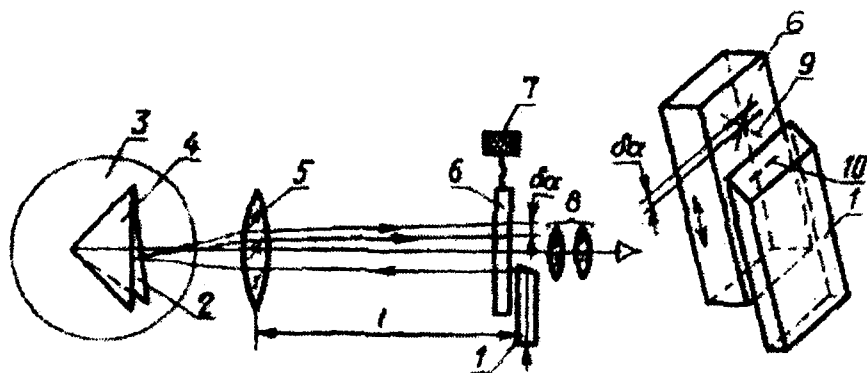


Рис. 70

3.3.5. Измерение углов с помощью оптических делительных головок

Оптическая делительная головка предназначена для угловых измерений и делительных работ при обработке изделий. С помощью маховика 1 (рис. 71) связанного с червячной передачей 12 поворачивают шпиндель 7 с лимбом 11 – шкала имеет цену деления 1° . Углы поворота шпинделя отсчитывают с помощью окуляра 4. Положение шпинделя после поворота может быть зафиксировано с помощью рукоятки 2 зажимного механизма. Посадочное отверстие шпинделя выполнено по конусу Морзе № 4 и может быть использовано для закрепления центра или детали с конусным хвостовиком.

Оптическую делительную головку 3 и заднюю бабку 5 с пинолью и центром устанавливают на станине 6, которая имеет продольный паз. В этот паз входят направляющие сухари корпуса оптической делительной головки и задней бабки с пинолью. Шпиндель оптической делительной головки и пиноль задней бабки должны быть соосны.

В промышленности широко применяют следующие типы оптических делительных головок: ОДГ-2 с ценой деления $2''$ и с двусторонним (совмещенным в поле зрения) отсчетом; ОДГ-5 с ценой деления $5''$ и с двусторонним отсчетом; ОДГ-10 с ценой деления $10''$ и с двусторонним или односторонним отсчетами; ОДГ-60 с ценой деления $60''$ и с односторонним отсчетом, но могут быть с двумя шкалами для отсчета по часовой стрелке и в обратном направлении.

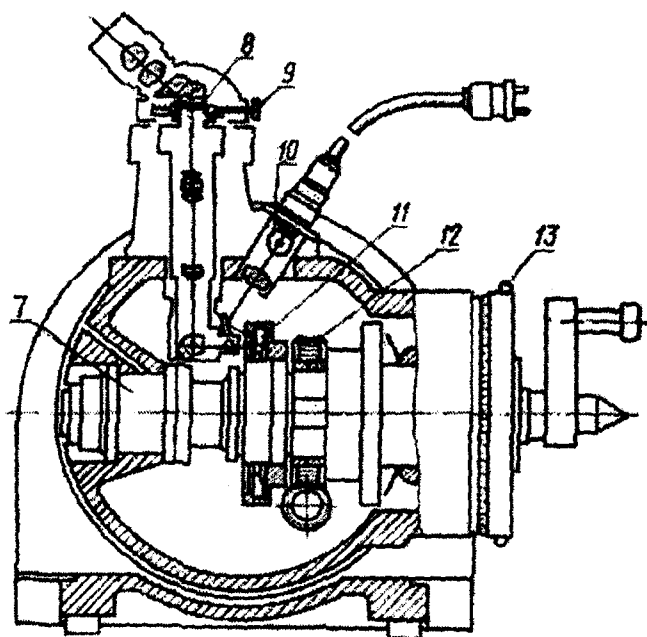
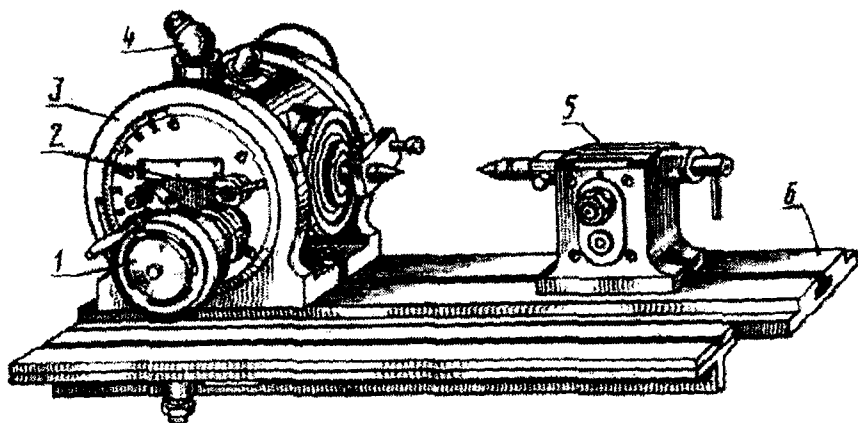


Рис. 71

В оптической делительной головке с односторонним отсчетом поток света от источника 10, пройдя через конденсор и отразившись от зеркала, осветит часть круговой шкалы 11 лимба. Эту освещаемую

часть и рассматривают с помощью отсчетного микроскопа, состоящего из объектива, окуляра и шкалы 8, расположенной между объективом и окуляром. Кроме того, между объективом и окуляром расположены две призмы полного внутреннего отражения, которые служат для поворота под соответствующим углом направления потока лучей света и создания удобных условий для наблюдателя при отсчете. Шкалу 8 можно перемещать с помощью микрометрического винта 9 и устанавливать нулевое показание. На шпинделе 7 помимо основного лимба закреплен лимб грубой установки 13 и центр.

У оптических делительных головок с ценой деления 60'' микро-винт 9 отсутствует, а шкала 8 неподвижна. На нее нанесены 60 делений с ценой деления 1'.

В оптической делительной головке может быть отсчетное устройство другой конструкции. Имеется подвижная шкала с диапазоном измерения 1° и ценой деления 2'; нониус 10'' длиной 2'. Обе шкалы сделаны прозрачными на черном фоне. Они накладываются одна на другую на узкой полоске. При перемещении шкалы с ценой деления 2' вместе с ней перемещается биссектор в виде двойного короткого штриха. При повороте градусного лимба в поле зрения появляются изображения градусных штрихов. Перемещением шкалы с ценой деления 2' вводят изображение штриха градусной шкалы в просвет биссектора и делают отсчет.

Оптическая делительная головка фирмы «Лейтц» имеет двусторонний (совмещенный в поле зрения) отсчет. Поток лучей света (рис. 72), пройдя через систему призм и линз 2, раздваивается и проходит через стеклянный лимб 1 в двух диаметрально противоположных участках шкалы с ценой деления 20'. Пройдя затем системы призм и линз 5, потоки лучей пройдут плоскопараллельные стеклянные пластины 10, а затем через призму 11 и систему линз 4 дадут на верхней и нижней половинах поля зрения шкалы 6 окулярного микрометра 3 два изображения диаметрально расположенных и освещаемых двойных штрихов лимба. Вращение кольца 7 через передачи 8 и 9 передается пластинам 10, и они поворачиваются навстречу друг другу, вызывая видимое в окуляре 3 взаимное смещение двойных штрихов лимба. Одновременно с поворотом пластин 10 вращается шкала 6 окулярного микрометра 3, деления которого видны в нижнем окошке поля зрения окуляра. Ее цена деления — 2''.

Для получения отсчета вращают кольцо 7 до тех пор, пока изо-

бражения двойных штрихов лимба 1, полученные от диаметрально противоположных участков шкалы, не совместятся. После чего суммируют отсчет в верхнем окошке поля зрения и по шкале окулярного микрометра в нижнем окошке.

Предел допускаемой погрешности оптических делительных головок при измерении любого угла на любом участке лимба составляет 2" у головок ОДГ-2; 5" у головок ОДГ-5; 10" у головок ОДГ-10 и 20" у головок ОДГ-60. Методы и средства поверки определены ГОСТ 8.046-73.

В настоящее время в соответствии с ГОСТ 9016-77 началось освоение оптических делительных головок с ценой деления 1" и 20". В стандарте для предела допускаемой погрешности введена математическая зависимость его от значения измеряемого или устанавливаемого угла, а также уточнены и ужесточены нормы точности. Головки будут оснащены отсчетным экраном.

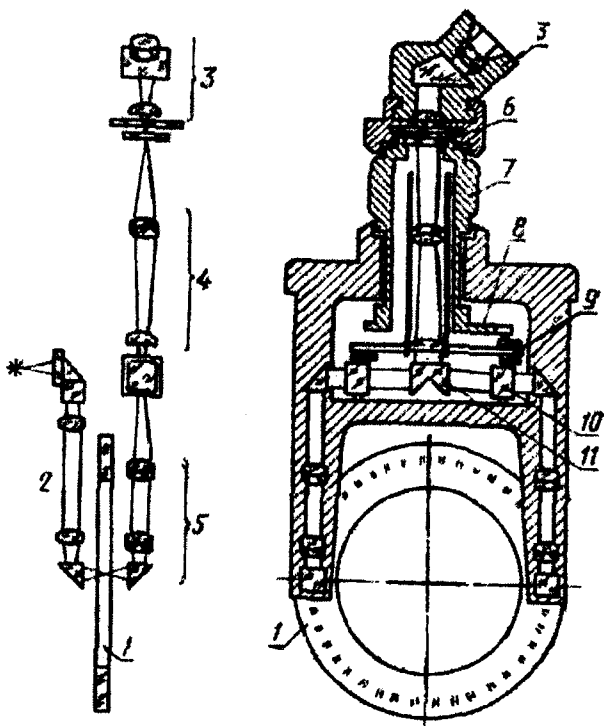


Рис. 72

3.3.6. Измерение углов на универсальном и инструментальном микроскопах

Измерение углов шаблонов, инструментов, профиля резьбы и т.п. может производиться на универсальном и инструментальном микроскопах с использованием отсчетного микроскопа окулярной угломерной головки. При измерении у шаблона угла α в поле зрения визирного микроскопа будут видны изображения шаблона и штриховой сетки. При установке риски сначала по одной стороне угла α , а затем по другой делают два отсчета. Их разность даст значение угла α .

Погрешность измерений углов окулярной угломерной головкой зависит от длины образующей l угла и определяется в угловых минутах по формуле

$$\Delta = \pm \left(3,5 + \frac{7}{l} \right),$$

где l выражена в миллиметрах.

3.3.7. Уровни

Уровень – прибор, предназначенный для контроля положения линий и плоскостей в пространстве, а также для измерения малых углов наклона.

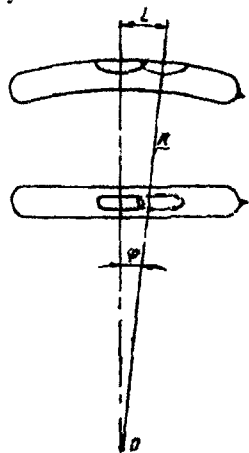


Рис. 73

Основным элементом уровня является ампула, закрепленная в корпусе прибора и представляющая собой стеклянную трубку, внутренняя поверхность которой изогнута по дуге определенного радиуса (рис. 73). Наполнитель ампулы по ГОСТ 2386-73 зависит от цены деления и температурного диапазона условий измерений. Это может быть этиловый ректифицированный спирт, этиловый наркозный эфир и др.

Ампулу заполняют жидким наполнителем и оба конца ее запаивают, оставляя внутри небольшое количество воздуха. Поверхность жидкости стремится занять горизонтальное положение, а пузырек – наивысшее, поэтому

при наклоне уровня шкала будет перемещаться относительно находящегося всегда в верхнем положении пузырька. Поворот ампулы на угол φ вызывает перемещение шкалы относительно пузырька на L . Значение L зависит не только от угла наклона φ , но и от радиуса кривизны R ампулы.

Между этими основными размерами ампулы существует математическая зависимость

$$\varphi = \frac{L}{R} \rho, \quad (15)$$

где $\rho = 1 \text{ рад} = 206265''$.

По ГОСТ 2386-73 цена деления шкалы $L = 2$ мм. Основным параметром уровня является цена деления. Ценой деления уровня является центральный соответствующий одному делению шкалы L угол дуги заданного радиуса R или угол, на который надо наклонить уровень, чтобы его пузырек переместился на одно деление шкалы L . Цена деления уровня выражается в угловых секундах или минутах или же в миллиметрах на 1 м.

Ампулы изготовляют с номинальной ценой деления: свыше $1'$ – малой точности, свыше $2''$ до $1'$ – средней точности и до $2''$ – высокой точности.

Важным параметром уровней является их чувствительность. Под чувствительностью уровня η принято понимать линейное перемещение пузырька, соответствующее единице угла наклона оси уровня, т.е.

$$\eta = c \cdot \frac{dL}{d\varphi}, \quad (16)$$

где $d\varphi$ – изменение угла наклона оси уровня;

dL – перемещение пузырька, соответствующее $d\varphi$;

c – коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единицы, в которой выражают результат.

Так как $dL = R d\varphi$, то формула (16)

$$\eta = cR = \frac{c\rho L}{\varphi}, \quad (17)$$

т. е. чувствительность уровня прямо пропорциональна R и обратно пропорциональна φ .

ГОСТ 2386-73 нормирует порог чувствительности ампулы, определяемый минимальным углом наклона ампулы, при котором перемещение пузырька становится заметным при наблюдении невооруженным глазом (0,2 мм), температурой и свойствами наполнителя. Для всех ампул, кроме круглой, порог чувствительности обычно составляет до 15% цены деления, а для круглой – 20%. Цену деления и чувствительность ампулы проверяют на экзаменаторе уровней. Практически уровни применяют при различных температурах, поэтому их испытывают при +50 и –50°C. Технические требования к ампулам уровней регламентируются ГОСТ 2386-73.

По конструктивным признакам ампулы делятся на следующие типы (рис. 74).

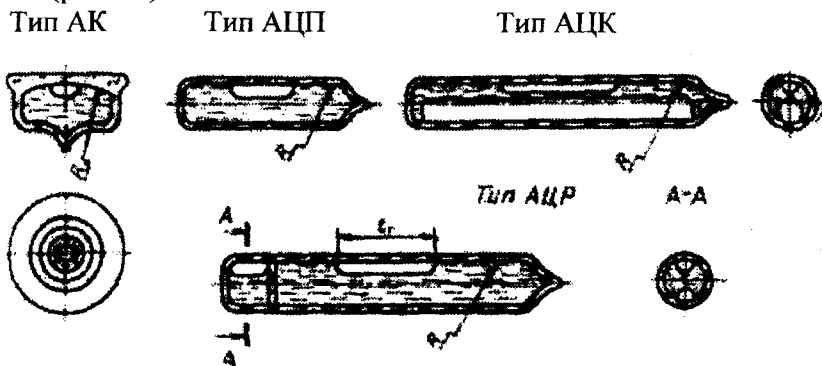


Рис.74

Тип АК – круглые (сферические) ампулы малой точности со шкалой в виде концентрических круговых рисок. Указателем служит край пузырька.

Тип АЦП – цилиндрические простые ампулы (с постоянной при заданной температуре длиной пузырька) малой и средней точности со штриховой шкалой или перекрестием в центре (вместо шкалы). Возможны пять вариантов расположения штрихов шкалы на ампуле. Указателем является край одного из концов пузырька.

Тип АЦК – цилиндрические компенсированные ампулы (с компенсационной палочкой внутри ампулы) средней и высокой точно-

сти со штриховой шкалой или перекрестием в центре (вместо шкалы). Возможны два варианта расположения штрихов шкалы на ампуле. Указателем является край одного из концов пузырька. В качестве компенсатора, обеспечивающего уменьшение влияния изменения температуры на длину пузырька, внутрь ампулы введена трубка из молочного стекла, заплавленная и закругленная с обоих концов. При неизменных размерах ампулы эта трубка уменьшает объем жидкости, заливаемой в ампулу. Поэтому неизбежное изменение длины пузырька, возникающее при изменении температуры из-за разности коэффициентов линейного расширения жидкости и стекла ампулы, будет меньше. При температуре 20°C допусковое колебание длины пузырька ± 1 мм.

Тип АЦР – цилиндрические камерные ампулы (с регулируемой длиной пузырька) средней точности со штриховой шкалой. Возможны четыре варианта расположения штрихов шкалы на ампуле. *Наносится также вторая, зеркальная, шкала (для рассматривания ее в зеркале).* Указателем является один из концов пузырька длиной l_1 . Внутри ампулы слева с помощью стеклянной перегородки образована камера, которая служит для уменьшения длины пузырька при повышении температуры или увеличения ее при понижении температуры. Пузырек укорачивают следующим образом. Вначале ампулу поворачивают вокруг оси на 180°, а затем – в плоскости оси по часовой стрелке, опуская вниз правый конец ампулы до тех пор, пока конец пузырька не войдет на определенную длину в камеру. После этого ампулу резко поворачивают вокруг ее оси на 180°, вследствие чего пузырек укорачивается, так как часть его остается в камере и не принимается во внимание при отсчетах.

Завод «Калибр» выпускает также не предусмотренные ГОСТ 2386-73 термостатированные ампулы – модель БВ-7193, созданную в Бюро взаимозаменяемости. Ампула помещена в вакуумированный стеклянный баллон на термоизоляционных прокладках. Цена деления шкалы основной ампулы 0,02—0,2 мм/м. При перепаде наружной температуры $\pm 25^\circ\text{C}$ погрешность составляет ± 1 деление ампулы.

Рассмотрим конструкции уровней, имеющих наибольшее применение в машиностроении.

Технические уровни. К ним относятся установочные, брусковые и рамные уровни.

Установочные уровни, укрепляемые непосредственно на станине прибора, предназначены для контроля его установки в горизонтальное положение. По конструкции они делятся на уровни с цилиндрическими и круглыми ампулами. Уровни с цилиндрическими ампулами изготовляют с ценой деления $10'' - 60'$, а уровни с круглыми ампулами – с ценой деления $5' - 60''$.

Брусковые уровни предназначены для контроля горизонтального расположения поверхностей при монтаже и проверке точности станков и других видов оборудования. По конструктивным признакам брусковые уровни, выпускаемые заводом «Калибр», делятся на нерегулируемые модели 112 и регулируемые модели 110 и 117. У нерегулируемых брусковых уровней ампулу устанавливают в корпусе с помощью клиньев и заливают твердеющим составом, после чего уровень не регулируют. У регулируемых брусковых уровней (рис. 75, а) ампула 3 установлена в корпусе 2, правый конец которого через плоскую пружину крепится винтом 5 к корпусу 4, а левый опирается на пружину и прижат винтом 1, служащим для регулирования уровня. Оба уровня имеют также поперечную ампулу б.

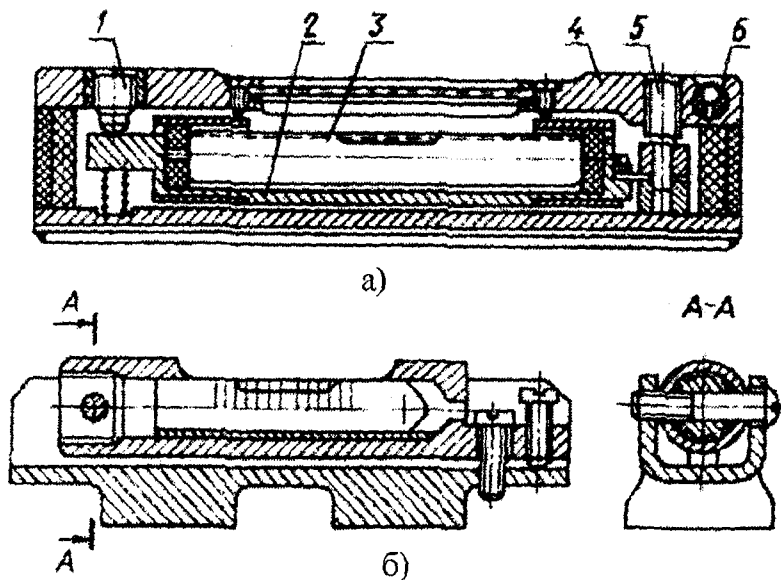


Рис. 75

К регулируемым брусковым уровням относятся также контрольные уровни (рис. 75, б), применяемые для проверки горизонтального положения специальных установок.

Рамные уровни предназначены для контроля горизонтального и вертикального расположения поверхностей при монтаже и проверке точности станков и других видов оборудования.

На рис. 76 изображен рамный регулируемый уровень завода «Калибр» модели 111. Он имеет две ампулы: основную (продольную) 1 и установочную (поперечную) 2. Положение продольной ампулы регулируется винтом 3. Завод «Калибр» также выпускает рамный уровень модели 113, нерегулируемый.

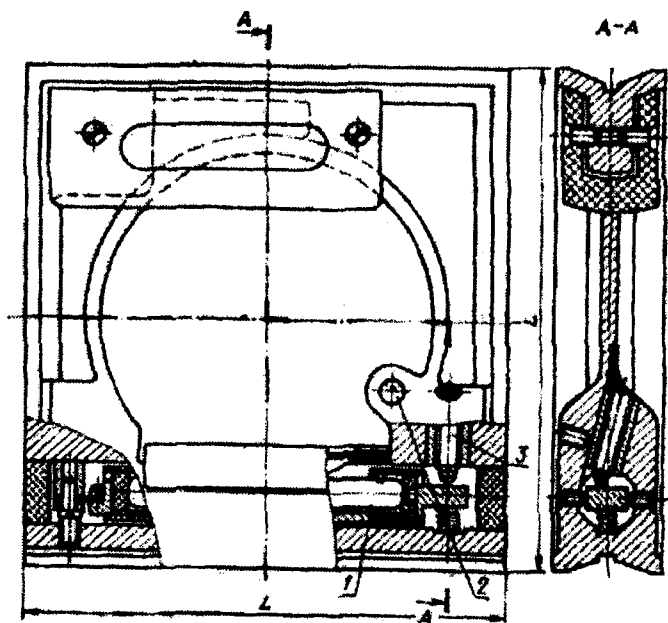


Рис. 76

Технические требования на уровни брусковые и рамные регламентируются ГОСТ 9392-75. Длина рабочих поверхностей $L = 100$; 150 ; 200 мм, а по требованию заказчиков может быть также 250 мм. Завод «Калибр» выпускает уровень, у которого $L = 200$ мм.

Цену деления основной ампулы завод «Калибр» устанавливает

следующих трех групп точности: 1-я группа – 4 – 10" или 0,02 – 0,05 мм/м; 2-я группа – 12 – 20" или 0,06 – 0,01 мм/м; 3-я группа – 24 – 40" или 0,12 – 0,2 мм/м. Допускаемые отклонения значения цены деления от нанесенного на уровне на различных участках шкалы не должны превышать 20%. Установочные (поперечные) ампулы уровней применяют с ценой деления 3 – 6', простые цилиндрические – с погрешностью установки относительно рабочей поверхности основания уровня не более одного деления ампулы. У регулируемых уровней при необходимости можно менять ампулу с последующим регулированием ее положения.

Уровни с микрометрической подачей ампулы. В соответствии с ГОСТ 11196-74 эти уровни изготавливают двух типов: с ценой деления 0,01 мм/м (2") и пределами измерений не менее ± 10 мм/м ($\pm 34'$) и с ценой деления 0,10 мм/м (20") и пределами измерений не менее ± 30 мм/м ($\pm 1^\circ 43'$).

На рис. 77 изображен микрометрический уровень с оптическим совмещением типа I модели 107 завода «Калибр». На основании 1 укреплен механизм уровня, закрытый сверху крышкой 2. Корпус 5 ампулы 4 укреплен с помощью пластинчатых пружин 11 и опирается одним своим концом на рычаг 3. При вращении микрометрического винта 10 рычаг 3 поворачивается вокруг оси 12 и вызывает поворот корпуса с ампулой по отношению к основанию прибора. На корпусе сверху помещена оптическая система, состоящая из призм 7 и 8, сводящих изображения половин концов пузырька уровня в одно поле зрения, что повышает точность отсчета. Для освещения пузырька в боковых стенках крышки сделаны два окошка и сверху окошко 6, закрытые стеклом. Результат измерения отсчитывают по лимбу 9, снабженному счетчиком оборотов лимба.

Совпадение изображений концов пузырька ампулы соответствует положению основания уровня на строго горизонтальной плоскости. В случае несовпадения микрометрический винт 10 поворачивают до совпадения этих изображений и по лимбу отсчитывают угол отклонения проверяемой плоскости от горизонтали.

Цена деления шкалы лимба 0,01 мм/м, цена деления счетчика оборотов 1 м/мм, пределы измерения ± 10 м/мм, погрешность прибора $\pm 0,01$ мм/м в пределах ± 1 мм/м и $\pm 0,02$ мм/м в пределах ± 10 мм/м.

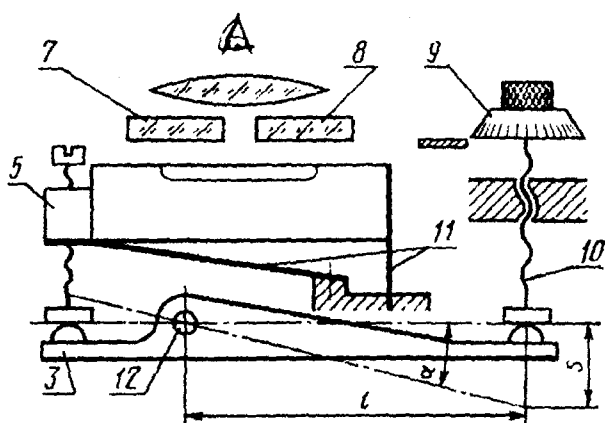
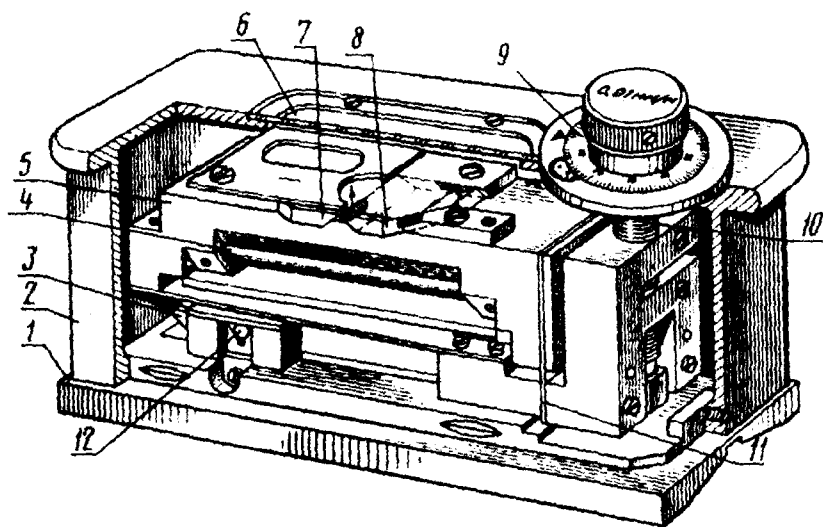


Рис. 77

Уровню присвоен государственный Знак качества. На рис. 78 изображен микрометрический уровень с ценой деления $0,1 \text{ мм/мм}$ типа II завода «Калибр». При вращении барабана 1 с микровинтом 2 корпус 3 ампулы 4 поворачивается относительно оси xx , вследствие чего изменяется показание уровня, отсчитываемое по шкале микрометрической головки и по ампуле. Уровень имеет камерную ампу-

лу, позволяющую регулировать длину пузырька при измерении в зависимости от температуры окружающей среды. Цена деления уровня 0,10 мм/м (20"), пределы измерений ± 30 мм/м ($\pm 1^{\circ}43'$).

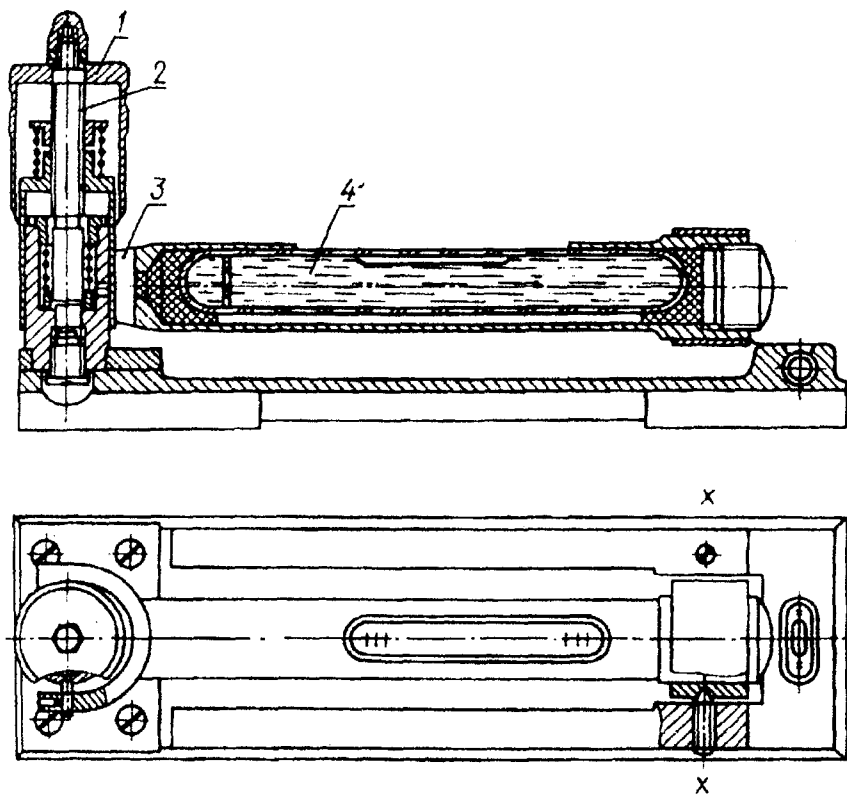


Рис. 78

Электроиндуктивный уровень. Завод «Калибр» выпускает модель 129 для контроля и измерения угла наклона плоскости. Измерение осуществляют методом непосредственной оценки и методом сравнения.

Диапазон измерения угловых величин по шкале барабана микроподачи 3° . Отсчет угла в диапазоне $\pm 8'$ выполняют по шкалам показывающего прибора, стоящего на выходе электронной схемы. Этот

частоту 10 кГц). Вторичные обмотки W_2' и W_2'' включены встречно (точка на рисунке около обмоток означает начало обмотки). Если якорь преобразователя Як, связанный с контролируемой плоскостью KII , находится на равном расстоянии δ_0 от обеих крайних стержней, выходное суммарное напряжение преобразователя $U_c = U_2' + U_2''$ (где U_2' и U_2'' – напряжения, снимаемые соответственно с обмоток W_2' и W_2'') равно нулю, так как $|U_2'| = |U_2''|$.

Если контролируемая плоскость наклонена на угол α , то $\delta_1 \neq \delta_2$. Так как напряжения U_2' и U_2'' являются (в определенных пределах) линейной функцией этих расстояний (зазоров), то соответственно изменятся и напряжения: одно увеличится на ΔU , второе – уменьшится на ту же величину. Из-за встречного включения обмоток изменение U_c составит $2\Delta U$. Таким образом, дифференциальное включение обмоток вдвое увеличивает чувствительность преобразователя.

Суммарное напряжение поступает на вход электронного блока ЭБ и после усиления и преобразования фиксируется стрелочным прибором $СИ$ (с нулем посередине), причем зафиксируется не только числовое значение, но и знак отклонения.

Упрощенная конструкция преобразователя изображена на рис. 79, б. Рабочие измерительные плоскости жесткой рамной конструкции корпуса 1 доведены и выполнены по форме, позволяющей ориентировать контролируемую поверхность как плоской, так и цилиндрической формы. Угол между рабочими поверхностями $90^\circ \pm 6''$. Механизм преобразователя состоит из опорной пластины 12, укрепленной на пружинах 2, 4 и 6, маятника 10, подвешенного на нитях 11 и 7 к опорной пластине 12, которая связана шарнирно с микровинтами 3 и 5 настройки. На пластине 12 расположена неподвижная часть преобразователя (катушки) 9, а якорь 8 закреплен на маятнике 10.

При установке прибора на наклонную плоскость маятник перекашивается, что приводит к повороту якоря и появлению выходного напряжения. Для проведения измерения следует установить барабаны микровинтов 3 и 5 в нулевое положение, а ручку установки нуля на панели электронного блока – в исходное положение. При этом прибор будет выставлен относительно горизонтальной (вертикальной) плоскости с погрешностью, не превышающей погреш-

ность микровинта 4". Для того, чтобы выставить преобразователь более точно, необходимо установить его на контрольную поверхность, затем установить в нулевое положение микровинты и ручку на панели ЭБ, а переключатель диапазонов — в положение 50".

При работе от базовой плоскости существуют два варианта использования уровня:

1) имеется рабочая поверхность, от которой в дальнейшем необходимо выполнять измерения. В этом случае преобразователь к работе подготавливают описанным выше способом; погрешность измерения не превышает цены деления показывающего прибора (если углы наклона не превышают $\pm 8'$);

2) имеется рабочая поверхность, от которой в дальнейшем необходимо провести измерения и угол наклона которой необходимо измерить по отношению к горизонту. Выполнив подготовку преобразователя и установив его на измеряемую поверхность, вращают микровинты до тех пор, пока не появится возможность отсчета по шкале $\pm 50''$. Чтобы точно провести отсчет по микровинтам, необходимо совместить штрихи на барабанах микровинтов со штрихами на корпусе микрогайки, снять отсчет на микровинтах и суммировать с ним показания стрелки показывающего прибора. Результат определяет угол наклона базовой плоскости по отношению к горизонту с погрешностью 2". Далее микровинтами ручной установки нуля стрелку показывающего прибора установить в нулевое положение. Уровень готов для измерения углов наклона от данной базовой поверхности с погрешностью, не превышающей цены деления стрелочного прибора.

Электролитические уровни. Потребности повышения точности и необходимость автоматизации некоторых измерений привели к появлению электролитических уровней. Они также имеют запаянную ампулу, наполненную токопроводящей жидкостью; перемещение жидкости измеряется по отношению к встроенным в ампулу электродам. Принцип действия электролитического уровня заключается в изменении электрических параметров системы электроды + жидкость при наклонах ампулы и изменении положения краев жидкости по отношению к электродам. Высокоточные электролитические уровни применяются во многих отраслях приборостроения. Среди них следует назвать устройства высокоточного контроля за положением фундаментов и высоких башенных сооружений, некоторые грави-

метрические приборы. Наиболее широко используют такие уровни в гироскопических приборах.

Функциональная схема одной из конструкций электролитического уровня показана на рис. 80. В этой схеме с генератора 7 высокочастотное напряжение в противофазе подается на пластины 2 и 3 и на фазовый детектор 6. При наклоне ампулы 4 изменяется диэлектрическая проницаемость, а следовательно, и емкость конденсатора, вследствие чего на пластине 1 возникает напряжение рассогласования, которое усиливается усилителем 5. Амплитуда напряжения рассогласования несет информацию о значении угла наклона, а фаза — о направлении наклона, что соответствующим образом регистрируется или подается в управляющий механизм для обработки заданного положения.

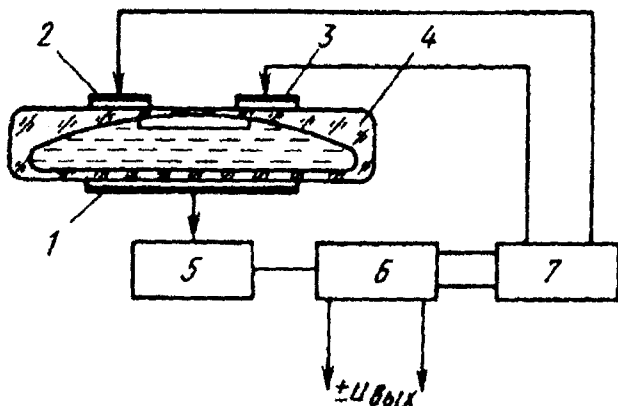


Рис. 80. Функциональная схема электролитического уровня

Точность определения углов наклона в электролитических уровнях выше, чем у жидкостных, однако им свойственны такие недостатки, как инерционность и зависимость от температуры. Для повышения термостабильности применяют теплоизоляцию.

Электронные наклономеры (электромагнитный уровень). Среди множества появившихся в последние годы электронных наклономерных устройств все более широкое применение находят устройства, снабженные маятником и работающие на электромагнитном принципе. Рассмотрим устройство электронного уровня,

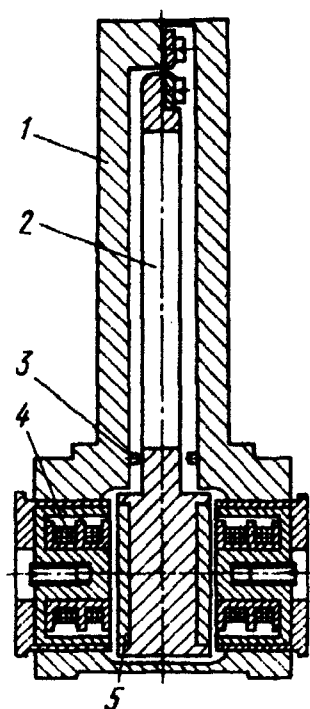


Рис. 81. Датчик электромагнитного уровня

ны по дифференциальной схеме. При наклоне маятника относительно корпуса полное сопротивление катушек изменяется на одно и то же значение, но с разным знаком. Это существенно повышает чувствительность устройства.

Структурная схема генераторно-усилительного блока с индикатором показана на рис. 82. Генератор 6 переменного тока выдает синусоидальное напряжение на схему включения 2 датчика 1. На выходе схемы включения при наклонах датчика появляется переменное напряжение, усиливаемое усилителем 3. Амплитудный детектор 4 выделяет измерительную информацию путем сравнения сигнала со схемы включения с сигналом с генератора. Усилитель 5 постоянного тока усиливает напряжение с выхода детектора и выдает его на регистрирующий прибор либо в систему автоматического привода на заданную установку.

работающего на принципе измерения изменений электромагнитных параметров. Конструкция такого уровня содержит датчик, генераторно-усилительную часть и индикатор. Датчик представляет собой электромеханическое устройство (рис. 81). Маятник 2 с двумя замыкателями 5 магнитопроводов катушек 4 подвешен на упругом подвесе к цельному корпусу 1. Ограничители 3 предохраняют замыкатели 5 от прикасания к катушкам во избежание залипания. Устройство упругого подвеса достаточно сложно. Чаще всего упругий подвес выполняют из стальной пружинной ленты толщиной 0,05...0,1 мм. Специальными исследованиями установлено, что при наклоне корпуса на угол ось маятника на таком подвесе (в пределах наклона до 1°) отклоняется на угол, составляющий $(0,15 \dots 0,4)\alpha$. Обмотки катушек датчика намотаны по дифференциальной схеме. При наклоне маятника относительно корпуса полное сопротивление катушек изменяется на одно и то же значение, но с разным знаком. Это существенно повышает чувствительность устройства.

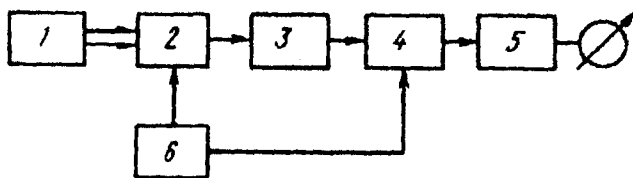


Рис. 82. Структурная схема электромагнитного уровня

Погрешность электромагнитных уровней складывается из инструментальной погрешности и погрешности отсчета. Так как для этих уровней лучше условия задания цены деления шкалы, погрешность отсчетов здесь может быть принята равной 0,1 деления. Случайная составляющая инструментальной погрешности для описанного уровня колеблется в пределах 0,12...0,2 цены деления, вследствие чего для уровней такого типа средняя квадратическая погрешность показаний принимается $0,17 < \sigma_{\text{з.у}} < 0,23$ цены деления. Так как в таких уровнях цена деления может быть задана в десятых долях угловой секунды, очевидны возможности повышения точности угловых измерений.

Квадранты. Ампулы применяют также и в угломерных приборах в качестве угломерного отсчетного устройства.

На рис. 83 изображен общий вид оптического квадранта, предназначенного для измерений угла наклона плоских и цилиндрических поверхностей, а также для установки их под заданным углом к горизонту. Квадрант состоит из плоского основания 9 с призматической выемкой, корпуса 4, внутри которого укреплен стеклянный лимб с ценой деления 1° , рассматриваемый в отсчетный микроскоп 1. Лимб и отсчетный микроскоп 1 по конструкции аналогичны применяемым в окулярной угломерной головке с ценой деления $1'$. Наружный диск 5 со шкалой 6 и указателем 10 служат для грубого отсчета угла поворота отсчетного микроскопа 1 относительно лимба. Этот поворот осуществляют винтом 8 и фиксируют винтом 2. На наружном диске 5 укреплены продольный уровень 7 с ценой деления $30''$ и установочный поперечный уровень 11 с ценой деления $2'$. Для облегчения отсчета по шкале продольного уровня введено зеркало 3. При установке квадранта на горизонтальную плоскость оба уровня и отсчетный микроскоп должны давать нулевое показание.

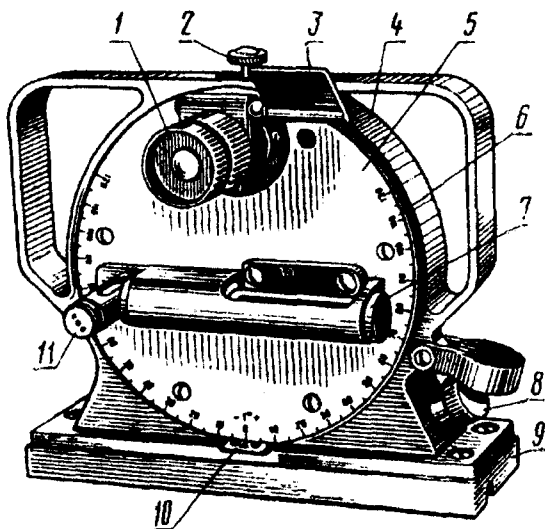


Рис. 83

Угол наклона поверхности с помощью квадранта измеряют следующим образом. Устанавливают квадрант основанием на исследуемую поверхность, затем ослабляют стопорный винт 2 и вращают диск 5 до тех пор, пока пузырек продольного уровня 7 не станет примерно в среднее положение. Закрепляют стопорный винт 2 и микровинтом 8 поворачивают диск 5 до тех пор, пока пузырек 7 не станет в положение нуль-пункт. После этого делают отсчет угла наклона исследуемой поверхности по отсчетному микроскопу 1.

Если необходимо по квадранту установить поверхность на определенный угол к горизонтали, то вначале описанным выше способом устанавливают квадрант на заданный угол, а затем ставят квадрант основанием на устанавливаемую на тот же угол поверхность и поворачивают эту поверхность до тех пор, пока пузырек продольного уровня 7 не станет в положение нуль-пункт.

В соответствии с ГОСТ 14967-70 оптические квадранты изготовляются четырех типов: КО-2; КО-5; КО-10 и КО-30. Номинальная цена деления шкалы отсчетного устройства равна соответственно 2; 5; 10 и 30". Пределы допускаемой погрешности квадранта соответственно ± 2 ; ± 5 ; ± 10 и ± 30 ". Методы и средства поверки регламентированы ГОСТ 13402-67.

Проверка уровней. Основными операциями проверки уровней являются определение правильности установки в нулевое положение и цены деления. Первую из этих операций осуществляют на поверочной плите, снабженной планкой упора и установленной примерно в горизонтальное положение (можно с помощью поверяемого уровня). Уровень ставят на плиту до упора и снимают отсчет α , затем уровень поворачивают на 180° вокруг вертикальной оси, ставят на плиту в такое же положение до упора и снимают второй отсчет β . Погрешность установки уровня в нулевое положение определяют как полуразность отсчетов $(\alpha - \beta)/2$. Допускаемым считается отклонение, составляющее $1/4$ деления шкалы ампулы. Цену деления уровня проверяют на экзаменаторе, который устанавливают на три опорные точки. Две из них связаны с регулировочными винтами, служащими для установки экзаменатора в горизонтальное положение. На призматические подставки укладывают поверяемые ампулы. Их можно укладывать также непосредственно на верхнюю доведенную поверхность экзаменатора. Вращением микрометрического винта поворачивают вокруг оси штангу экзаменатора на угол, отсчитываемый по круговой шкале. Шаг микровинта $P = 0,25$ или $0,5$ мм.

От шага зависит расстояние L между центром оси вращения штанги (и, следовательно, уровня) и осью винта (шкалы) и число делений на круговой шкале. Последние должны быть такими, чтобы номинальная цена деления шкалы равнялась целому числу секунд: $1''$, $2''$, $5''$, $10''$ и т. д. исходя из соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = P / L, \quad (18)$$

где α — угол поворота штанги экзаменатора при одном обороте микрометрического винта.

Ввиду малости угла α можно написать

$$\alpha = P / L,$$

где α выражен в радианах.

Как видно из формулы (18), погрешность отсчета угла зависит от точности изготовления микровинта по шагу P и от точности выполнения экзаменатора по размеру L .

Для определения влияния погрешностей этих элементов на погрешность показаний экзаменатора найдем полный дифференциал

функции. Сделав преобразования, получим:

$$d\alpha = 0,5(dP / P - dL / L) \cdot \sin 2\alpha. \quad (19)$$

Из формулы (19) видно, что предельная погрешность показаний экзаменатора прямо пропорциональна углу поворота α , неточности изготовления шага винта dP и определения расстояния dL .

Как видно из формулы (19), малая цена деления экзаменатора может быть достигнута увеличением L или уменьшением P . Однако эти изменения можно делать в известных пределах, так как с увеличением L увеличиваются габаритные размеры прибора, а с уменьшением P возрастают технологические трудности изготовления винта.

В конструкции экзаменатора завода «Калибр» для получения малой цены деления при небольших габаритных размерах введен четырехзвенный шарнирный механизм (рис. 84, а). При повороте микрометрического винта 7 с круговой шкалой 6 штанга 8 поворачивается вокруг оси O и перемещает соответственно налево или направо клин 1, жестко связанный с плитой 2, на которую укладывают поверяемую ампулу или уровень 4. Так как плита 2 подвешена на тягах 3 и 5 неодинаковой длины, то при перемещении клина 1 плита 2 поворачивается на небольшой угол даже при значительных линейных перемещениях винта 7.

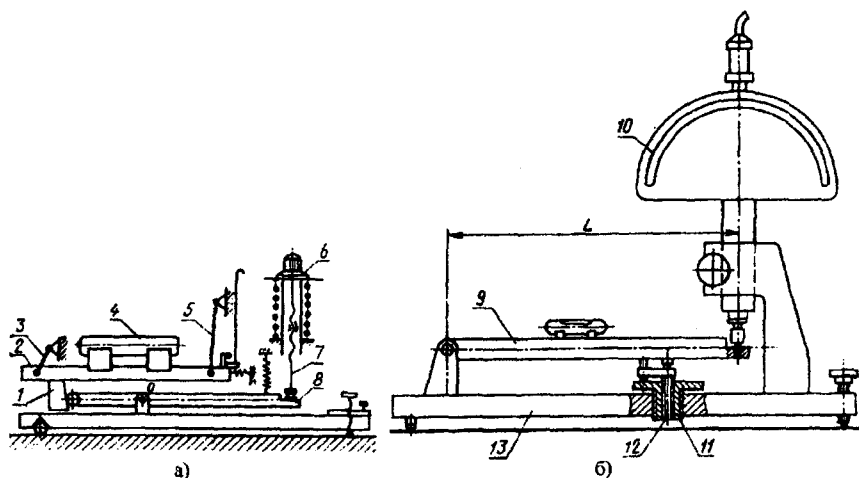


Рис.84

В экзаменаторе модели 130 завода «Калибр» (рис. 84, б) в качестве отсчетного устройства 10 может быть использован оптикатор, оптиметр или многооборотный индикатор 1МИГ. При расстоянии $L = 206,3$ мм линейное перемещение на 1 мкм, определяемое по отсчетному устройству, соответствует угловому повороту плиты 1". Малые повороты плиты 9 достигаются применением дифференциального винта 11. Он ввинчен в планку 13, имеет внутреннюю резьбу, в которую ввинчивается винт 12 со штифтом, не позволяющим ему вращаться. Шаг обеих резьб берут с отличием 0,05 – 0,1 мм, поэтому при повороте винта 11 на один оборот винт 12 переместится на разность шагов. Погрешность экзаменатора $\pm 1''$ при установке оптиметра и $\pm 4''$ при установке индикатора 1МИГ.

Процесс определения цены деления ампулы или уровня на экзаменаторе сводится к сопоставлению изменения показания ампулы или уровня с изменением показания экзаменатора при повороте его микровинта.

3.3.8. Угломеры

Для измерения углов изделий в машиностроении контактными методом широко применяют угломеры с нониусом и оптические. Угломеры с нониусом в соответствии с ГОСТ 5378-66 изготавливают двух типов: УМ – для измерения наружных углов и УН – для измерения наружных и внутренних углов (рис. 85).

Угломеры состоят из съемной линейки 1, основания 2, микроподачи 3, нониуса 4, стопора 5, сектора 6, оси 7, державки 8, угольника 9 и подвижной линейки 10.

Выпускают угломеры с нониусом 2'; 5' и 15' и погрешностью соответственно $\pm 2'$; $\pm 5'$ и $\pm 15'$.

Существенным фактором, влияющим на погрешность, является несовпадение центров основной шкалы и шкалы нониуса. Чтобы исключить влияние этого фактора, необходимо строго согласовать координаты отверстий под винты и шпильки у нониусов и основных угломерных шкал.

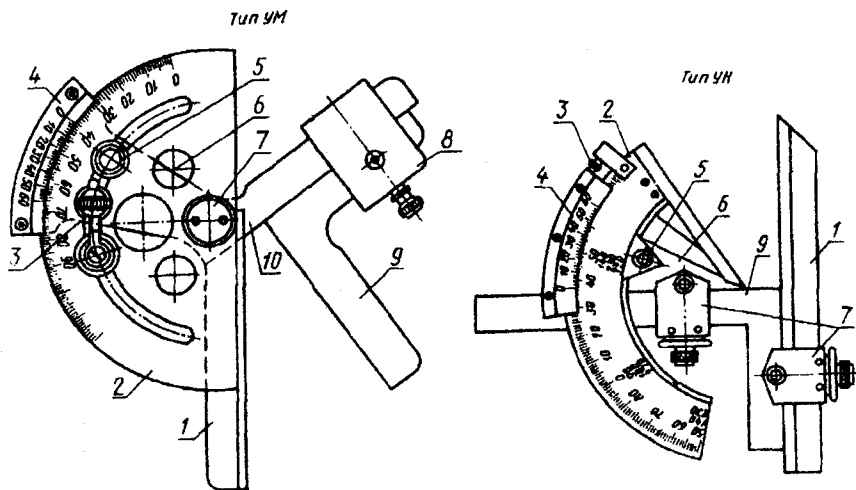


Рис. 85

Нониус определяют по формуле

$$C = c' / n,$$

где c' – цена деления шкалы основания;

n – число делений нониуса.

Угломером УМ можно контактным методом измерять наружные углы от 0 до 180° (от 0 до 90° с угольником 9 и от 90 до 180° – без угольника 9). Конструкция угломера позволяет также выполнять разметочные работы на плоскости.

Угломер УН, у которого нониус 2', является более универсальным. Общий диапазон измерений угломером УН от 0 до 320°; пределы измерений наружных углов 0 – 180°; предел измерений внутренних углов 40 – 180°; пределы измерений высот с помощью угольника 0 – 100 мм и с помощью линейки 0 – 115 мм методом сравнения с концевыми мерами длины.

Оптический угломер (рис. 86) предназначен для измерения контактным методом углов от 0 до 180° между двумя плоскостями или между плоскостью и образующей цилиндра либо конуса.

Основные параметры и размеры оптического угломера, а также

технические требования к нему регламентированы ГОСТ 11197-73.

В оптическом угломере линейка 5 со сквозной прорезью вдоль ее оси соединена с корпусом, внутри которого неподвижно укреплен лимб 8, имеющий полную угловую шкалу с ценой деления 1. Шкала разделена на четыре квадранта со шкалами от 0 до 90°.

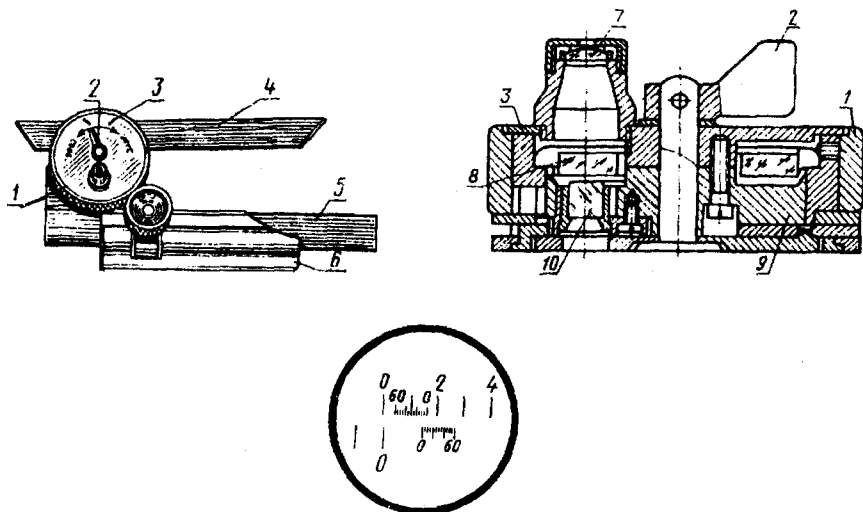


Рис. 86

Линейку 4 можно перемещать в направлении ее оси и поворачивать вокруг центра корпуса 9 на определенный угол по отношению к линейке 5. В продольном положении линейку 4 фиксируют поворотом стопорного рычага 2. В продольный паз линейки 4 входят шпонка, связанная с верхним диском 3, на котором установлена лупа 7 с увеличением $40\times$, и стекло 10 со шкалами с ценой деления 5'. В поле зрения лупы 7 видны две шкалы с ценой деления 5' и изображение части круговой шкалы 8, освещенной через стекло 10. В данном случае отсчет будет $1^{\circ}35'$, он определяет угол между линейками 4 и 5. Этот угол устанавливают поворотом по часовой стрелке накатанного кольца 1 и фиксируют стопорным рычагом 2. Подставка 6 с плоской поверхностью и с призматическим углублением служит для установки угломера на плоскую или цилиндрическую поверхность при специальных измерениях.

Погрешность оптического угломера $\pm 2'30''$. Погрешность угломера с подставкой, предназначенной для измерения угла, одна из сторон которого является образующей цилиндрической или конической поверхности, $\pm 5'$.

Методы и средства поверки угломеров с нониусом и оптических угломеров регламентированы ГОСТ 13006-67.

4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Отклонения формы цилиндрических деталей могут быть вызваны изменением радиуса или диаметра. В соответствии с этим различают следующие методы измерений: радиальный, оперирующий разностью радиусов, и диаметральный - двухконтактный (рис. 87, а) или трехконтактный (рис. 87, б), оперирующий разностью диаметров.

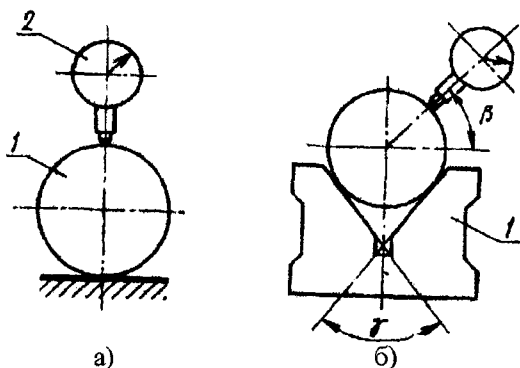


Рис. 87. Схемы измерения отклонений формы цилиндрических поверхностей диаметрально: а - двухконтактным, б - трехконтактным

Радиальный метод – универсальный, применяемый к любым отклонениям, независимо от характера. Измерения этим методом производят с помощью сравнительно новых и сложных приборов – кругломеров. Диаметральный метод – прост. Он обеспечивает высокую производительность измерений, но не дает полной и точной картины отклонений профиля.

Для измерения большинства элементарных отклонений профиля цилиндрических поверхностей и отклонений от цилиндричности при

отсутствии нечетной огранки и отклонений от прямолинейности оси (изогнутости) *используют универсальные приборы для наружных измерений* 2 (рис. 87). Дело сводится к двухконтактному измерению диаметра детали 1 в одном или нескольких сечениях. Овальность и четную огранку определяют как полуразность двух взаимно перпендикулярных диаметров, конусообразность – как полуразность диаметров, измеренных в двух сечениях на концах детали, бочкообразность и седлообразность – как полуразность диаметров, измеренных в трех сечениях вдоль оси. Отклонение от цилиндричности приближенно определяют измерением диаметра также в трех сечениях, и в каждом сечении – в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Полуразность между наибольшим и наименьшим диаметрами принимают за отклонение от цилиндричности.

Измерительные головки (индикаторы часового типа, микрокаторы, оптикаторы и т. д.) применяют для определения отклонений от прямолинейности оси нечетной огранки. Отклонение от прямолинейности оси измеряют вращением детали 1 на плоском столике 3 (рис. 88, а) или на ножевидных опорах 4 (рис. 88, б). В первом случае отклонение равно разности отсчетов измерительной головки 2, во втором – полуразности. Нечетную огранку измеряют трехконтактным методом при вращении детали в призме. Призма дает возможность измерять детали диаметром от 3 до 300 мм. Результат измерения зависит не только от значения огранки, но и от числа граней детали угла призмы. При измерении (рис. 87, б) в призме 1 устанавливают деталь, а измерительную головку обычно наклоняют на угол β , причем линия измерения должна быть параллельна одной из граней призмы.

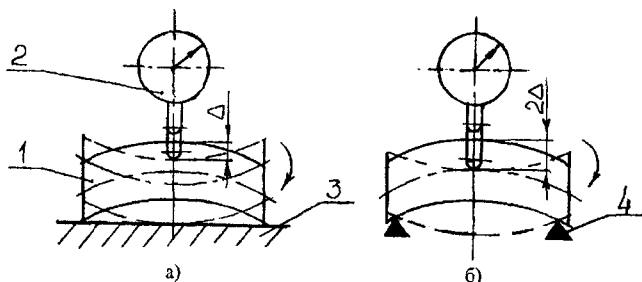


Рис. 88. К определению отклонения от прямолинейности оси:
а - на столике; б - на ножевых опорах

Разность показаний S измерительной головки связана со значением огранки $\Delta_{ог}$ зависимостью $S = k\Delta_{ог}$, где k – так называемый коэффициент воспроизведения огранки. Наиболее часто применяемые трехконтактные устройства с параметрами $\gamma = 120^\circ$, $\beta = 30^\circ$ и $\gamma = 60^\circ$, $\beta = 60^\circ$ дают одинаковый $k = 2$ для наиболее часто встречающихся огранок с числом граней 3; 5; 7 и 9.

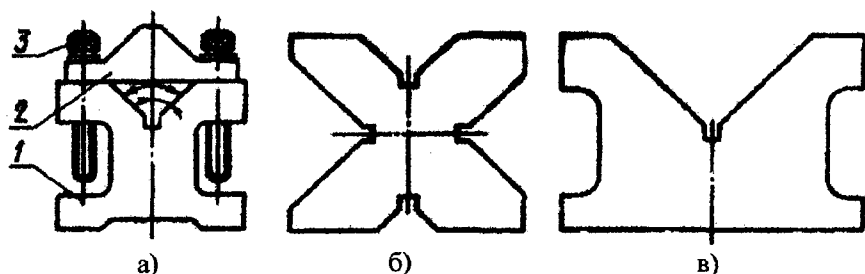


Рис. 89. Типы поверочных и разметочных призм

Призмы поверочные и разметочные (ГОСТ 5641-82) предназначены для установки при измерениях, в частности поверке, и при разметке деталей цилиндрической формы. Призма имеет призматические выемки с углом 90° . Основания призмы и выемки имеют доведенные поверхности. Габаритные размеры призм от $35 \times 40 \times 30$ до $300 \times 125 \times 270$ мм. В комплект поставки входят две призмы, имеющие одинаковые габаритные размеры.

Различают призмы типов П1, П2 и П3. Призмы типа П1 предназначены для более точных измерений деталей диаметром до 110 мм. Такие призмы 1 (рис. 89, а) имеют одну призматическую выемку, снабжены накладкой 2 и двумя винтами 3 для крепления детали. Призмы типа П2 (рис. 89, б) имеют четыре призматические выемки, призмы типа П3 (рис. 89, в) – одну такую выемку. Призмы типов П1 и П3 изготовлены из закаленной стали; типа П2 – из чугуна. Стальные призмы могут иметь классы точности 0; 1 и 2; чугунные – классы точности 1 и 2. Допускаемые отклонения от параллельности призматических выемок к основанию и боковым граням на длине призматической выемки для класса точности 0 в зависимости от типоразмера составляют от 2,5 до 5 мкм, для класса точности 1 – от 4 до 15 мкм; для класса точности 2 – от 8 до 25 мкм.

4.1. Кругломеры

Кругломеры предназначены для измерения в лабораторных условиях отклонений от круглости наружных и внутренних поверхностей деталей в сечении, перпендикулярном их оси, с автоматической записью при большом увеличении отклонений профиля на специальной диаграмме - кругломере - в полярной системе координат, а в ряде случаев и с цифровым отсчетным устройством. Принцип действия заключается в сличении профиля измеряемой детали с исходной окружностью, воспроизводимой вращением прецизионного шпинделя. При этом деталь устанавливают на стол и центрируют с осью вращения шпинделя. С наружной и внутренней цилиндрической поверхностью детали соприкасается наконечник щупа преобразователя, который имеет радиальное перемещение, соответствующее изменению радиуса измеряемой детали. Механическое перемещение щупа преобразуется в электрические сигналы, которые усиливаются электронным блоком и поступают на самописец или на цифровое отсчетное устройство. Отклонение от круглости по круглограмме определяют по специальному шаблону как наибольшее расстояние от точек реального профиля до прилегающей окружности. Увеличение записи (чувствительность) – это отношение изменения значения записанной величины к изменению измеряемого размера. Каждый прибор имеет широкий набор увеличений. При малом допуске круглости детали работают с большими увеличениями, при большом допуске – с меньшими увеличениями.

Типы кругломеров (ГОСТ 17353-80): КН – с вращающимся измерительным преобразователем (стационарные и накладные); КД – с вращающейся (на столе) измерительной деталью. В кругломерах типа КН нагрузка на шпиндель определяется только его собственным весом и весом преобразователя. У кругломеров типа КД деталь, устанавливаемая на вращающийся стол, создает дополнительную нагрузку на опоры при вращении шпинделя. Поэтому они предназначены только для деталей ограниченного веса. Кругломеры кроме округлости могут измерять обширную номенклатуру параметров формы и расположения (и здесь возможности кругломеров типов КН и КД в общем случае не совпадают). Так, например, кругломеры имеют приспособления: для измерения соосности наружной и внутренней поверхностей вращения и соосности отдель-

ных шеек вала и отверстий; для измерения отклонений от плоскостности торца, от перпендикулярности торца к оси детали и параллельности торцов. Кроме того, имеются приспособления для измерения прерывистых деталей, имеющих шпоночные канавки, шлицевые пазы, лыски и т. д.

Кругломер модели 289 – прибор с вращающимся преобразователем, а модели 290 – с вращающимся столом. Наименьший размер измеряемых поверхностей на кругломере модели 289 составляет для наружных поверхностей 0,5 мм, внутренних 3 мм, наибольший размер для наружных и внутренних поверхностей 400 мм. На кругломере модели 290 наименьшие размеры те же самые, наибольшие 250 мм. Габаритные размеры измеряемых деталей на кругломерах 289 и 290 не более 400×400×400 мм (ширина × длина × высота) и 250×250×250 мм; масса деталей не более 80 и 10 кг соответственно. Скорость вращения шпинделя кругломеров при измерении около 3 об/мин, наибольшее число неровностей, регистрируемых за один оборот, 500.

Цена деления шкалы шаблона, имеющего неизменный интервал между концентрическими окружностями, равный 2 мм, меняется от выбранного масштаба увеличения. Если, например, запись производили с увеличением 2000[×], то цена деления шаблона составит 1 мкм. Увеличение при записи у кругломера модели 289 составляет от 25 до 20000[×], у модели 290 от 40 до 10000[×]. Цена деления при этом составляет соответственно от 80 до 0,1 мкм и от 50 до 0,2 мкм. Предел допускаемой радиальной погрешности (радиальное биение) для кругломера модели 289 составляет 0,05 мкм, для модели 290 – 0,12 мкм; предел допускаемой осевой погрешности (биение в осевом направлении) 0,12 и 0,15 мкм соответственно.

Осевое биение шпинделя практически не сказывается при измерении цилиндрических поверхностей. Однако оно ощутимо влияет при измерении отклонения от круглости конических и сферических поверхностей, а также от плоскостности и параллельности торцов.

Рассмотрим конструкцию кругломера на примере модели 289 (рис. 90). В дальнейшем при описании кругломеров, в частности их поверки, будем рассматривать эту же модель. На литой чугунной станине 1 размещен координатный стол 5, на котором устанавливаются измеряемую деталь 4 и перед началом измерения центрируют ее относительно оси шпинделя 2. Для этой цели в столе имеются два механизма микропередачи 6 и 7, с помощью которых стол может

перемещаться в двух взаимно перпендикулярных направлениях при центрировании детали. На нижнем торце шпинделя расположен первичный преобразователь, щуп 3 которого касается в радиальном направлении измеряемой детали. Преобразователь можно перемещать в радиальном направлении при настройке на различные диаметры детали. Корпус кругломера жгутом 13 соединен с тумбой 12, в верхней части которой находится счетно-решающий блок 8, предназначенный для обработки поступающих электрических сигналов, фиксирования и хранения результатов измерений. Вычисленное значение отклонения от круглости фиксируется на цифровом отсчетном устройстве 9 в виде трех цифр с дискретностью отсчета 1; 0,1 или 0,01 мкм в зависимости от увеличения. Например, при увеличении $100\times$ дискретность отсчета составляет 1 мкм, при $20000\times$ 0,01 мкм. Причем при цифровой индикации отклонение от круглости не соответствует его определению, т. е. оно вычислено не от прилегающей, а от средней окружности, которая расположена так, что среднее квадратическое отклонение записанной круглограммы до этой окружности минимально.

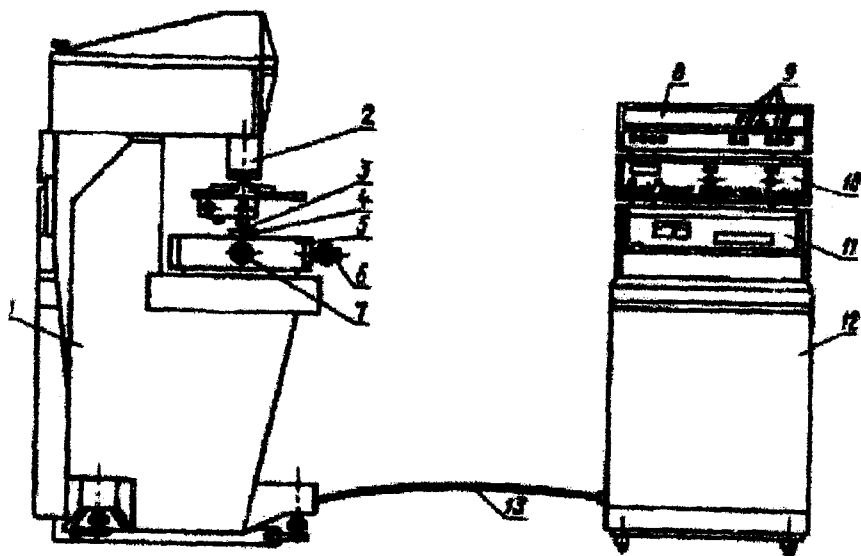


Рис. 90. Кругломер с вращающимся преобразователем модели 289

При сглаживании технологического процесса, когда нужно выявить наличие огранки, овальность эксцентриситета детали и т. д., на записывающем устройстве 11 дополнительно записывается круглограмма в полярных координатах. При расшифровке круглограммы 1 (рис. 91) прилегающую окружность выбирают с помощью шаблона - прозрачной прямоугольной пластины из органического стекла. На шаблоне расположена отсчетная шкала - семейство концентрических окружностей с радиальным шагом, равным 2 мм. Шаблон вручную накладывают на снятую с прибора круглограмму и перемещают до тех пор, пока одна из концентрических окружностей 2 не займет положения прилегающей. От нее и производят отсчитывание (Δ на рис. 91). На свободных от окружностей участках пластины наносят таблицы с указанием цены деления шкалы при различных увеличениях. Измерительный блок 10 (рис. 90) предназначен для установки соответствующего увеличения и электронного фильтра. В кругломере предусмотрено шесть электронных фильтров. Включая один из них, можно не фиксировать или фиксировать с уменьшенной амплитудой неровности тех или иных частот, имеющих на измеряемой поверхности. Каждый фильтр имеет свою частотную характеристику, т. е. пропускает неровности определенных частот.

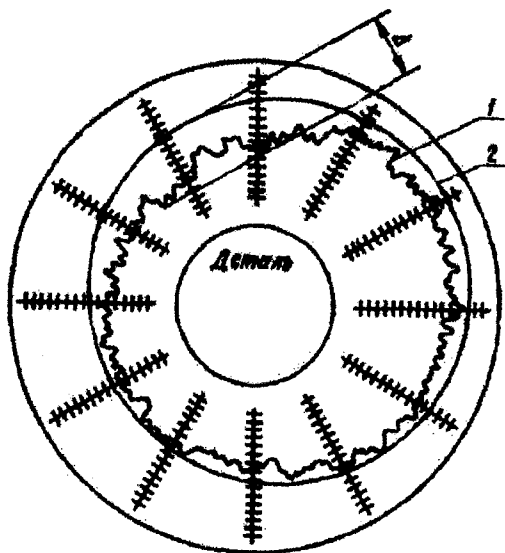


Рис. 91. Круглограмма

Перед измерением деталь устанавливают на предметный стол, закрепляют и осуществляют предварительное центрирование относительно измеряемого сечения. Для этого преобразователь перемещают в горизонтальном направлении до тех пор, пока между наконечником щупа и измеряемой деталью останется небольшой зазор (1-2 мм). При этом щуп расположен против механизма микроподачи стола. Повернув рукой шпиндель на 180° , определяют на глаз зазор с другой стороны и с помощью механизма микроподачи выравнивают зазоры. То же повторяют в перпендикулярном направлении. Выравнивая зазоры, плавно подводят преобразователь к детали до тех пор, пока наконечник щупа не коснется измеряемой детали и стрелка индикатора измерительного блока не выйдет на середину шкалы. Затем последовательно осуществляют полуавтоматическое и автоматическое (окончательное) центрирование, более производительное по сравнению с ручным, применяющимся у ранних моделей кругломеров. На ручное центрирование, как правило, затрачивалось во много раз больше времени, чем на само измерение, продолжающееся в течение одного оборота шпинделя.

Полуавтоматическое центрирование совмещает автоматический поворот шпинделя на 90° с ручным перемещением детали с помощью механизмов микроподачи стола. Указателем при этом является индикаторный прибор, показывающий в масштабе, соответствующем выбранному увеличению, смещение центра детали относительно оси вращения шпинделя.

Автоматическое центрирование – по существу центрирование записи относительно центра диска с помощью электронной схемы прибора. Автоматическое центрирование осуществляется за два оборота. При первом обороте фиксируются координаты оставшегося эксцентриситета, при втором вносится поправка и производится запись круглограммы.

Различные типы и конструкции кругломеров выпускают многие иностранные фирмы. Например, кругломеры английской фирмы «РЭНК ТЭЙЛОР ГОБСОН»: Талиронд - 73, предназначенный для сверхточных лабораторных измерений деталей средних размеров, и Талоронд - 200 - для менее точных измерений в цеховых условиях. При создании новых моделей кругломеров большое внимание уделяется разработке автоматического центрирования (поскольку эта операция наиболее трудоемка); применению цифрового отсчета;

измерению отклонений от прямолинейности образующей цилиндра с использованием прецизионного продольного движения шпинделя; обеспечению быстроты и наглядности при промежуточных наблюдениях, чему способствует показ на экране электроннолучевой трубки профиля измеряемой детали на фоне базовой окружности, осуществлению цифрпечати отклонений формы.

4.2. Кругломеры зарубежных фирм

За рубежом кругломеры выпускаются в Англии, США, ФРГ и Японии. Ниже рассматриваются в основном новые модели кругломеров, разнообразные по конструкции и метрологическим характеристикам, получившие название «Талиронд». Большинство из них выпускается известной английской фирмой Rank Taylor-Hobson.

Кругломер модели «Талиронд-51» широко применяется в промышленности. Кругломер модели «Талиронд-2» предназначен для проверки крупногабаритных деталей.

В столе прибора имеется (обычно закрытое диском) отверстие, используемое при установке длинных валов. В центре диска расположено небольшое отверстие для установки зажимных приспособлений при проверке более коротких деталей.

Стол может перемещаться только в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях на расстояние 12,5 мм от центра стола. Все вертикальные перемещения осуществляются блоком шпинделя, установленным на каретке, передвигающейся по вертикальным направляющим колонны прибора. Колонна может поворачиваться вокруг вертикальной оси, что исключает возможность повреждения блока шпинделя при установке больших деталей. Узел шпинделя установлен на опорах скольжения с гидродинамической смазкой, остальные узлы прибора унифицированы с соответствующими узлами модели «Талиронд-51».

Для работы с прибором «Талиронд-2» фирма выпускает специальные приспособления для измерения длинных валов и проверки прямолинейности.

Приспособление для измерения валов (рис. 92) предназначено для закрепления и точной установки цилиндрических валов и шпинделей длиной до 1270 мм, диаметром до 254 мм. Приспособление состоит из двух поддерживающих штанг 2, установочной планки 1 с опор-

ными фиксаторами, трех упорных кронштейнов 3, 5, 6 и стального шарика диаметром 12,7 мм (на рисунке не показан). Поддерживающие штанги пропускаются через специальные отверстия в столе прибора, нижние концы штанг соединены поперечиной.

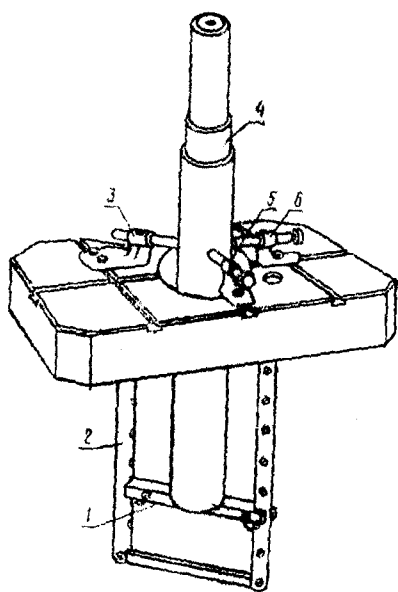


Рис. 92

Вдоль штанг с интервалом 75 мм одно от другого расположены отверстия, в которые вставляются опорные фиксаторы. Фиксаторы удерживают установочную планку на высоте, определяемой длиной проверяемого вала. В центре верхней плоскости планки в коническом гнезде помещают стальной шарик, на который центровым отверстием опирается проверяемая деталь 4 (если деталь не имеет центрального отверстия, необходимо вставить фальшивый центр). Кронштейны устанавливаются в Т-образные пазы стола и закрепляются гайками. Кронштейны предназначены для установки оси детали параллельно с осью шпинделя. В кронштейнах 5 и 6 имеются пиноли с регулировочными винтами, в кронштейне 3 – пружина сжатия.

После установки детали необходимо обеспечить ее соосность со шпинделем либо с помощью точного угольника и двух регулировочных винтов, смещающих пиноли кронштейнов, либо с помощью щупа, длина которого позволяет обеспечить наибольшую длину перемещения детали в вертикальном направлении. Последний способ применяется, если вал ступенчатый или имеет буртики.

Приспособление для проверки прямолинейности позволяет механически перемещать узел шпинделя относительно каретки прибора в пределах 100 мм, что значительно облегчает установку детали по отношению к оси шпинделя при проверке concentricity и плоскостности.

В комплект приспособления входят коробка передач с электро-

двигателем и пульт управления. Коробка передач монтируется на каретке прибора и соединяется шестерней с ручным приводом вертикального перемещения шпинделя. Скорость механического перемещения шпинделя 152 или 30 мм/мин.

К кругломерам «Талиронд-51» и «Талиронд-2» прилагается ряд приспособлений, расширяющих метрологические возможности этих приборов. Например, приставка – счетно-решающее устройство, вычисляющее параметры базовой окружности (за нее принимается средняя окружность) и определяющее расстояние от нее до наиболее удаленной точки круглограммы.

Для определения этих величин в счетно-решающее устройство должны быть введены две координаты: линейная величина, характеризующая колебания радиуса детали (это сигнал преобразователя, подаваемый на записывающее устройство), и угловая величина – угол поворота шпинделя кругломера. Для получения второй величины необходимо связать преобразователь угла поворота со шпинделем. В качестве преобразователя используется двухступенчатый потенциометрический преобразователь, подвижные элементы которого вращаются синхронно со шпинделем кругломера.

Счетно-решающее устройство может выполнять три вида операций: расчет параметров средней окружности и отклонений от нее; расчет параметров среднего эллипса (в случаях, когда круглограмма является четко выраженным овалом и нужно оценить отклонения от него более высоких порядков) и отклонений от него; автоматическое исключение эксцентриситета проверяемой детали.

Для облегчения гармонического разложения круглограммы в ряд Фурье с использованием универсальных вычислительных машин нужны кодированные данные в виде таблиц или перфолент. Перфоленты можно получить непосредственно на кругломере при измерении детали с помощью одноканальной аналого-цифровой системы типа LY-1474, выпускаемой фирмой Solartron (Англия) для приборов типов «Талиронд» и «Талисерф» (последний – для измерения шероховатости).

Система состоит из аналого-цифрового преобразователя, стрелочного прибора, кодирующего устройства, перфоратора и блока управления. Аналоговый сигнал измеряется и преобразуется в цифровой вид в диапазоне 0 – 999 мВ с погрешностью ± 1 мВ. Измеренное значение напряжения появляется на цифровом табло в виде

трехзначного числа. Перфорирование можно нести в любом коде с пятью дорожками. Блок управления обеспечивает синхронизацию работы преобразователя и перфоратора, приводимого в действие от сети. Информация, содержащаяся на перфоленте, вводится в вычислительную машину для последующей обработки.

Кроме того, к кругломерам «Талиронд-51» и «Талиронд-2» предусматриваются следующие приспособления:

накладной стол для центрирования и нивелирования деталей;
центрирующий стол для быстрого центрирования деталей различных диаметров;

магнитная призма для закрепления небольших деталей типа шариков, роликов, колец и т. п.;

приспособление для проверки прерывистых поверхностей;

приспособление для проверки концентричности поверхностей;

приспособление для проверки плоскостности торцов.

Конструкция последних трех приспособлений аналогична конструкции подобных приспособлений для кругломера модели 218 завода «Калибр».

На выставке СИМА – Объединения предприятий научного приборостроения – демонстрировался ряд новых приборов, выпускаемых английской фирмой Rank Taylor-Hobson. Основные из них – усовершенствованные модели кругломеров «Талиронд-51» и «Талиронд-2», которые были названы соответственно моделями «Талиронд-73» и «Талиронд-3».

Электронные схемы новых приборов полностью переведены на полупроводники, расширены пределы увеличений до 20000^x , расширены полосы пропускания фильтров, вдвое увеличены скорости измерения. Самописец выполнен в виде отдельного блока. Изменена конструкция привода вращения шпинделя: отсутствует коробка передач – двухскоростной электродвигатель через муфту напрямую соединен со шпинделем.

Вместо прижимных щеток, через которые передавался сигнал от измерительного преобразователя, использован разъем с гибким приводом, обеспечивающий постоянный надежный контакт.

В модель «Талиронд-3» встроен привод вертикального перемещения стола (предел перемещения 100 мм) вместо отверстия в столе.

Оба прибора снабжены новой вычислительной приставкой, собранной на интегральных элементах, что позволило в несколько раз

уменьшать ее габариты по сравнению с предыдущей конструкцией. На лицевой панели приставки размещены три показывающих прибора. По одному из них отсчитывается среднее арифметическое отклонение кривой профиля от средней окружности, высота наибольшего выступа и глубина наибольшей впадины, а также их арифметическая сумма. Измеряемый параметр выбирается с помощью двух тумблеров.

По двум другим показывающим приборам отсчитывают координаты центра проверяемого профиля по осям X и Y относительно центра диаграммного диска.

Приставка позволяет также автоматически центрировать запись относительно диаграммного диска. Все измеряемые параметры отсчитываются в миллиметрах или дюймах.

Кругломер модели «Талиронд-200» – настольный прибор оригинальной конструкции, предназначенный в основном для работы в лаборатории.

Кругломер модели «Талиронд-100» – компактный настольный недорогой прибор, все его узлы, включая электронную схему и самописец, размещены в одном корпусе. Шпиндель прибора – на опорах скольжения. В качестве измерительного преобразователя использован стандартный индуктивный преобразователь «Талилин-4».

Прибор может быть использован также для проверки концентричности наружных и внутренних поверхностей, расположенных в одной плоскости, параллельности нескольких горизонтальных поверхностей и перпендикулярности оси проверяемой детали к ее торцу.

Фирма FAG Kugelfischer (ФРГ) выпускает кругломеры «Талитрон R-20» и «Эйр-Трейсер», демонстрировавшиеся на выставке SIMA в 1968 г. Оба прибора работают совместно с универсальной измерительной пневматической системой и самописцем, получившим название «Эйр-Граф».

Кругломер модели «Талитрон R-20» предназначен для измерения тяжелых крупногабаритных деталей.

Прибор состоит из стола, П-образной стойки-портала, каретки со шпинделем и преобразователя. Для установки тяжелых деталей с помощью грузоподъемного оборудования стол можно выдвигать из-под портала по рельсам, расположенным на полу. Стол прибора выполнен в виде рамы, внутри которой расположены ряды цилиндров. Их торцовые поверхности образуют рабочую плоскость стола.

В средней части перекладки портала установлена каретка, которая может перемещаться по взаимно перпендикулярным направлениям в горизонтальной плоскости на шариковых опорах. Ход каретки ± 12 мм от среднего положения. Привод осуществляется от двух шаговых двигателей с дистанционным управлением.

В каретке смонтирован основной узел кругломера – прецизионный шпиндель на аэростатических подшипниках.

Шпиндель может наклоняться относительно каретки на небольшой угол, что позволяет компенсировать неперпендикулярность установочного торца проверяемой детали к ее оси.

Наклон шпинделя осуществляется с помощью винта, воздействующего на гильзу шпинделя. Нижней опорой гильзы служит участок шаровой поверхности, относительно которой и наклоняется шпиндель. Шпиндель может перемещаться в вертикальном направлении относительно гильзы в пределах 450 мм. Он приводится во вращение от электродвигателя через коробку передач.

На нижнем торце шпинделя установлена направляющая планка, на которой закрепляются преобразователь и противовес. В первых моделях прибора был использован пневматический преобразователь типа «сопло-заслонка», в настоящее время разрабатывается прибор с индуктивным преобразователем.

Кругломер модели «Эйр-Трейсер» – накладной прибор, предназначенный для измерения глубоких отверстий.

Прибор состоит из измерительной головки, вставляемой в отверстие, блока привода и трех соединительных карданных тяг. Головка прибора имеет одну подпружиненную и две пары раздвижных ножек, с помощью которых осуществляется центрирование. В центре головки расположены шпиндель и преобразователь. Шпиндель вращается в прецизионной шариковой втулке.

На шпинделе эксцентрично с осью его вращения закреплен кронштейн, на конце которого установлен пневматический преобразователь, работающий по принципу «сопло-заслонка». Фирмой запатентовано оригинальное пневматическое устройство, позволяющее поворачивать кронштейн относительно шпинделя, меняя тем самым расстояние от преобразователя до оси вращения шпинделя. Это расстояние определяется диаметром измеряемого отверстия, и его можно менять в пределах до 20 мм.

После того как преобразователь установлен в рабочем положении

нии, кронштейн пневматическим зажимом жестко закрепляется на шпинделе. Во время измерения шпиндель с преобразователем вращается относительно неподвижной головки.

Фирма FAG Kugelfischer выпускает разнообразные накладные кругломеры, отличающиеся длинами кронштейнов, несущих преобразователь, и сменными опорными ножками.

4.3. Преобразование и регистрация сигнала измерительной головки

Система преобразования и регистрации сигнала измерительной головки кругломера состоит в общем случае из пяти основных элементов: щупа, измерительной головки, преобразователя, блока усилителя, блока частотных фильтров и регистрирующего прибора.

Щуп измерительной головки входит в состав преобразовательной системы кругломеров, использующих контактный метод измерения. В бесконтактных (обычно емкостных) системах этот элемент отсутствует. Щуп представляет собой механический рычаг, передающий перемещения измерительного наконечника чувствительному элементу преобразователя. Измерительный наконечник закрепляется на одном плече рычага, а чувствительный элемент – на втором. Передаточное отношение рычага выбирается конструктивно, его абсолютное значение и доля в общем передаточном отношении прибора существенной роли не играют, так как задача усиления сигнала и обеспечение необходимой шкалы увеличений решается блоком усилителя. Основное внимание при конструировании щупа и системы его подвески должно быть уделено правильному выбору их динамических параметров.

В процессе измерения некруглости щуп измерительной головки кругломера перемещается в радиальном относительно детали направлении, следуя за неровностями профиля. На приборах с вращающимся шпинделем измерительная головка дополнительно находится в состоянии равномерного вращательного движения. Щуп обладает некоторой массой и моментом инерции, в системе его подвески могут быть использованы различного вида пружины и обязательно присутствуют пружины, обеспечивающие измерительное усиление. Точность процесса воспроизведения щупом отклонений формы зависит от перечисленных параметров, определяющих

его поведение под влиянием возмущения, обусловленного неровностями контролируемой поверхности. Мы отметим только основные требования к конструкции щупа и системы его установки, которые должны быть выполнены для того, чтобы исключить возможность появления ошибок измерения.

1. Измерительное усилие, с которым щуп поджимается к детали, должно быть достаточно мало, чтобы гарантировать проверку поверхности от повреждения и исключить смятие неровностей в процессе обкатки. Из опытных и расчетных материалов, полученных при исследовании контактных методов измерения шероховатости поверхности, известно, что уже при очень небольших (порядка $9,8 \cdot 10^{-3}$ Н) давлениях деформации профилируемой поверхности могут превзойти предел упругости.

2. Параметры щупа, механизма его подвески и механизма обеспечения измерительного усилия должны быть подобраны из условия исключения возможности отскока наконечника от проверяемой детали. Для приборов с вращающейся измерительной головкой при выполнении этого условия должны быть приняты во внимание как центробежная сила, так и силы инерции, возникающие в результате радиальных перемещений щупа по неровностям профиля. Та из сил, которая окажется больше, принимается в расчет необходимого усилия поджима наконечника. В приборах, работающих с неподвижной измерительной головкой (вращается проверяемая деталь), центробежная сила на наконечник головки не действует, и при расчетах учитываются только силы, возникающие во время радиальных перемещений.

Конструкция измерительных головок современных кругломеров, как правило, предусматривает возможность изменения измерительного усилия как по значению, так и по направлению. Направление измерительного усилия изменяется на противоположное при переходе от проверки наружных поверхностей к проверке внутренних и наоборот. Измерительное усилие определяется с помощью рычажной установки типа весов. Равноплечий рычаг на ножевой опоре нагружается на одном плече измерительным усилием установленной на стойке измерительной головки, а на втором – гириями. Стрелка, связанная с рычагом, и риска на шкале позволяют точно определить положение равновесия.

3. Важным параметром щупа является частота его собственных колебаний ω_c . Она должна быть по крайней мере вдвое больше, чем

частота возмущающих сил ω_b , чтобы исключить возникновение условий резонанса $\omega_c \geq 2\omega_{b \max}$

Резонанс недопустим не только в связи с опасностью отрыва наконечника от проверяемого профиля (при достаточно большом измерительном усилии отрыва не будет и на резонансной частоте), но и потому, что при резонансе могут иметь место колебания щупа без отрыва наконечника от детали, а это исказит и амплитуды и фазы регистрируемых неровностей.

Собственно преобразователь является следующим за щупом звеном системы преобразования сигнала. В кругломерах используются три вида преобразователей: индуктивные, емкостные и пневматические. Два первых превращают механические перемещения наконечника в электрический сигнал, усиливаемый затем электронной схемой и подаваемый на отсчетный или регистрирующий прибор. В пневматических преобразователях изменение положения наконечника трансформируется в изменение давления воздуха, которое далее усиливается пневмосистемой. Возможно создание пьезоэлектрических преобразователей, а также комбинированных пневмоэлектрических или оптико-электрических устройств, но практического применения в кругломерах они пока не нашли.

Типовая схема индуктивного преобразователя показана на рис. 93, а. Преобразователь состоит из Е-образного сердечника, на внешних пластинах которого расположены обмотки, а на средней закреплена опора якоря, жестко связанного со щупом. Каждая внешняя пластина вместе со средней и якорем образует магнитный контур, замыкающийся через воздушный зазор h . Сопротивление такого контура зависит от ширины воздушного зазора. Поэтому, если на каждую катушку подать от генератора напряжение высокой частоты, амплитуда сигнала будет изменяться при изменении зазора. Питающее катушки преобразователя напряжение называют несущей частотой, а изменение его амплитуды в связи с изменением зазора — амплитудной модуляцией несущей частоты. Катушки соединяют в мостовую схему, как это показано на рис. 93, б.

К одной из диагоналей моста подключается генератор несущей частоты, а со второй сигнал подается в блок усилителя. При вертикальном положении щупа зазоры между крайними пластинами сердечника и якорем равны. Мостовая схема регулируется так, чтобы в этом положении сигнал в диагонали моста был равен нулю. При

смещении щупа баланс мостовой схемы нарушается и в усилитель поступает сигнал, пропорциональный этому смещению. Другой вариант схемы индуктивного преобразователя показан на рис. 93, в. Внутри корпуса 2 размещены две одинаковые катушки 3 и 5, разделенные изоляционной прокладкой 4. Сердечник 6 на стержне 7, выполненном из немагнитного материала, перемещается внутри катушек. Как и в предыдущем случае, катушки питаются напряжением несущей частоты. Когда сердечник расположен симметрично относительно катушек, схема сбалансирована. При смещении сердечника из среднего положения баланс нарушается и преобразователь трансформирует это смещение в электрический сигнал.

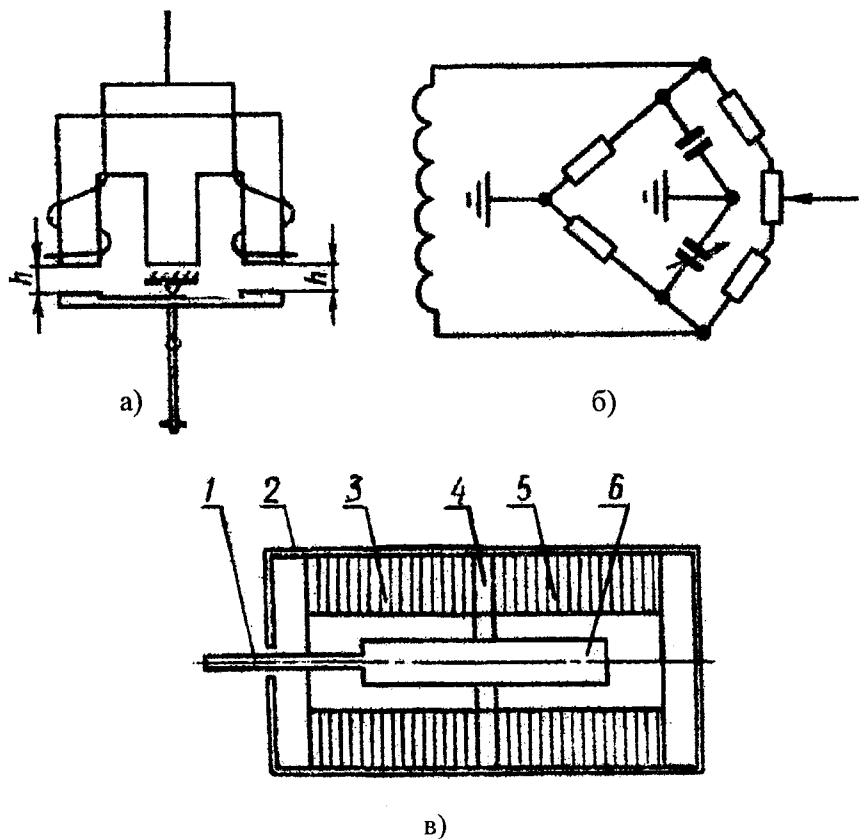


Рис. 93

Емкостные преобразователи в серийно выпускаемых кругломерах до настоящего времени не использовались. Они встречаются в лабораторных установках типа стендов для проведения экспериментов, связанных с измерением некруглости или погрешности вращения.

Пример измерительной головки с пневматическим преобразователем представлен на рис. 94, а.

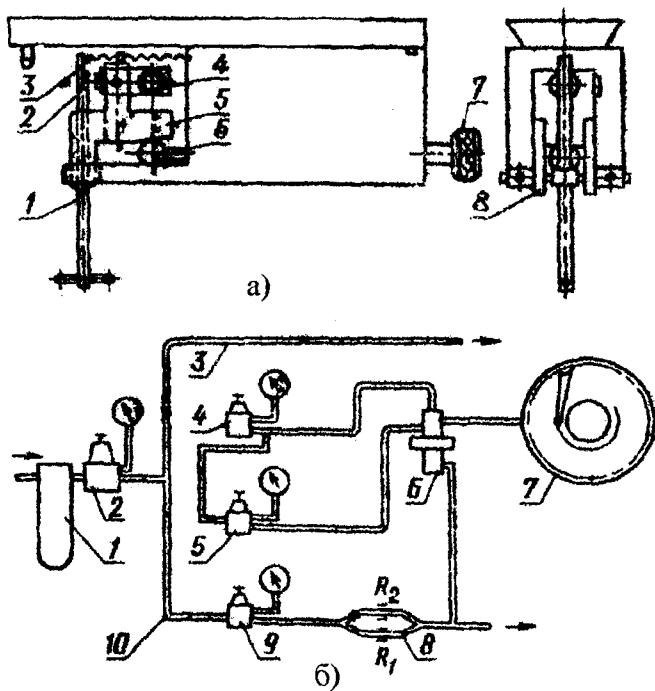


Рис. 94

Щуп 1 подвешен на конических опорах 8 и на верхнем конце имеет доведенный диск 2. Напротив диска установлено пневматическое сопло 4 диаметром 1,6 мм. Зазор между торцами сопла и диска регулируется перемещением шарика 6, упирающегося в скос державки 5 сопла. Шарик перемещается посредством микровинта 7. Верхний конец щупа соединен пружиной 3 со штифтом, запрессованным в верхнюю часть державки сопла. Вторая пружина 3 уста-

новлена между штифтом державки и корпусом измерительной головки. Пружины служат для создания и изменения направления измерительного усилия. Рабочее давление воздуха, подаваемого в измерительную головку, равно $0,28 \text{ кгс/см}^2$. В результате перемещений измерительного наконечника, обусловленных погрешностями формы проверяемой детали, меняется зазор между диском щупа и соплом, вследствие чего меняется давление в пневматической цепи прибора. Последняя (см. рис. 94, б) питается от сети через фильтр 1 и редуктор 2, обеспечивающий стабильное давление $4,2 \text{ кгс/см}^2$. От редуктора 2 воздух по шлангу 3 подается в подшипники шпиндельного узла кругломера, а по шлангу 10 поступает через второй редуктор 9 и регулятор 8 к измерительной головке. Редуктор 9 обеспечивает давление, равное $0,28 \text{ кгс/см}^2$, а регулятор меняет увеличение измерительной системы ($1000\times$ или $5000\times$) в зависимости от того, открыты ли оба канала R_1 и R_2 или только R_1 . Сигналы измерительной головки поступают в усилитель 6, а от него к самописцу 7. Характеристика измерительной головки имеет прямолинейный участок, ограниченный давлениями от $0,18$ до $0,32 \text{ кгс/см}^2$. Чтобы обеспечить работу в этом диапазоне, усилитель разделен диафрагмой на две камеры. В одну из них через редукторы 4 и 5 подается давление $0,19 \text{ кгс/см}^2$, а вторая камера соединена с измерительной головкой. В результате нулевое положение прибора соответствует давлению $0,19 \text{ кгс/см}$, а нелинейная начальная часть характеристики отсекается.

Недостатком пневматических систем (преобразования и обработки сигнала) является их большая инерционность и, соответственно, малое быстродействие по сравнению с электрическими системами. Поэтому частотная характеристика приборов, использующих пневматические преобразователи, имеет очень низкий верхний предел пропускания, и с их помощью можно выявлять лишь низкочастотные отклонения формы (менее 10 неровностей на оборот), да и то при весьма малых скоростях вращения шпинделя (порядка 1 об/мин и меньше). В итоге такие системы недостаточно полно информируют об объекте измерения при низкой производительности контроля. В настоящее время пневматические преобразователи встречаются в кругломерах очень редко.

Усилители, применяемые в кругломерах, принципиально не отличаются от широко известных усилительных схем, используемых в приборах для контроля шероховатости поверхности, стандартных

измерительных головах для измерения малых линейных перемещений, в обычной радиоаппаратуре. В стандартах ряда стран, в том числе и в СНГ, регламентируется предпочтительный ряд коэффициентов увеличения, которые должны обеспечиваться блоком усилителя кругломера. ГОСТ 17353-71 рекомендует выбирать увеличения из следующего ряда: 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000; 10000; 20000; 50000. В большинстве приборов ряд увеличений, обеспечиваемых усилителем, шире рекомендуемого стандартом. В первую очередь это относится к кругломерам с вращающейся измерительной головкой, где часто используются сменные измерительные щупы разной длины. Каждому размеру щупа соответствует свой ряд увеличений, и часть его значений может не совпадать со значениями ряда, соответствующего щупу другой длины. Для того, чтобы иметь возможность подобрать одинаковые увеличения при разных щупах (это облегчает контроль взаимного расположения отдельных сечений детали), в усилителях некоторых приборов предусматриваются делители, позволяющие умножить любое значение основной шкалы увеличений на дополнительный коэффициент, выбираемый в диапазоне 0,5 – 2 с дискретностью 0,1. Максимальное увеличение, принятое в том или ином приборе, зависит от точности последнего. Для кругломеров класса 1 оно не должно быть менее 20000^{\times} , класса 2 – 10000^{\times} , класса 3 – 5000^{\times} и класса 4 – 2000^{\times} .

В зависимости от класса точности прибора регламентируется и допускаемая погрешность увеличения, под которой понимается модуль отношения разности между действительным и номинальным значениями увеличения к номинальному его значению, выраженный в процентах. Допускаемые погрешности увеличения равны: 3 % для кругломеров класса точности 1; 5 % для кругломеров класса 2; 8% для кругломеров класса 3; 10% для кругломеров класса точности 4.

Аналогичные допуски выдерживаются обычно и иностранными фирмами, выпускающими кругломеры, хотя за рубежом деление их на классы точности не стандартизовано.

Методика калибровки и проверки увеличения кругломера сводится к тому, что щупу измерительной головки сообщаются перемещения, размер которых известен с достаточно высокой точностью, а выходной сигнал усилителя регистрируется и сопоставляется с исходным перемещением. Калибруются, таким образом, совме-

стно два звена – измерительная головка и усилитель. Если же регистрация производится записывающим прибором кругломера, как это обычно бывает при сдаточно-приемочных испытаниях или при периодической поверке прибора, то калибруется вся система преобразования сигнала измерительной головки. Схему усиления сигнала удобно строить таким образом, чтобы увеличение регулировалось не раздельно на каждой ступени, а только на одной из них. При этом важно правильно выбрать ту степень увеличения, на которой наиболее целесообразно провести калибровку. Дело в том, что погрешность увеличения тесно связана с нелинейностью амплитудной характеристики измерительной головки. Когда калибруют увеличение на одной из ступеней, выбирают определенное смещение щупа и регулируют чувствительность преобразователя так, чтобы при этом смещении увеличение точно соответствовало номинальному.

Частотные фильтры кругломера. Кругломеры предназначены для измерения отклонений формы деталей (включая волнистость), т. е. определенного диапазона неровностей поверхности. В характеристике каждого конкретного прибора указывается, какое максимальное число неровностей на окружности детали можно зарегистрировать с его помощью. При этом имеются в виду условные неровности с плавным синусоидальным профилем, расположенные на окружности равномерно. Если учесть, что шпиндель кругломера вращается с некоторой постоянной скоростью ω , совершая один оборот за время T (в секундах), то очевидно, что число регистрируемых за один оборот неровностей – это, по существу, частотная характеристика, показывающая, какую полосу частот колебаний измерительного наконечника прибор пропускает. Нижней границей этой полосы всегда является нулевая частота, а верхней – частота $f_{гр} = N / T$, Гц, где N – максимальное число регистрируемых неровностей. Колебания, частота которых превышает $f_{гр}$, регистрируются кругломером с заниженной амплитудой или совсем не регистрируются. В этом смысле кругломер в целом может рассматриваться как частотный фильтр. Своеобразным механическим фильтром является и измерительный наконечник, стандартный размер радиуса которого не позволяет ему реагировать на неровности, характеризующие шероховатость поверхности. Современные кругломеры, использующие индуктивные преобразователи, позволяют регистрировать несколько сотен равномерно расположенных на окружности неров-

ностей за один оборот шпинделя. В ГОСТ 17353-71 частотная характеристика кругломеров регламентируется в зависимости от класса точности прибора и должна обеспечивать регистрацию не менее 150 неровностей на окружности для кругломеров классов 1, 2, 3. Для приборов класса 4 эта граница соответствует 50 неровностям на окружности, а для пневматических кругломеров — 15 неровностям. Экспериментальное изучение частотных спектров неровностей деталей, контролируемых с помощью кругломеров, показывает, что практически встречающееся наибольшее число относящихся к погрешностям формы неровностей на окружности детали не превышает 250. Отклонения более высокой частоты встречаются редко, и в тех случаях, когда они присутствуют, их амплитуды настолько малы, что существенно на форму детали не влияют. Эти данные получены на основе амплитудно-частотного анализа 1000 круглограмм деталей, обработанных на различных моделях токарных, расточных, круглошлифовальных, внутришлифовальных и бесцентровошлифовальных станков. Круглограммы были получены с помощью прибора «Талиронд-51», позволяющего регистрировать до 450 неровностей на окружности. Анализ выполнялся посредством набора прозрачных шаблонов, на которых были нанесены окружности, разделенные на секторы, соответствующие угловому шагу неровностей определенной частоты. Для каждой круглограммы определялись частоты наиболее характерных неровностей и их амплитуды, а затем строилась гистограмма распределения частот характерных отклонений. Помимо выявления практически значимой верхней границы реального частотного спектра некруглости деталей, анализ показал, что наиболее часто встречаются частоты, лежащие в диапазоне 2 — 16 неровностей на окружности, и что для каждого станка при фиксированном режиме обработки характерен стабильный спектр отклонений от круглости, который включает в себя от двух до четырех четко выраженных частот. Отсюда следует, что при исследовании причин возникновения погрешностей формы, а также для анализа характера присутствующих на детали отклонений желательно иметь возможность избирательной регистрации частот при измерении некруглости. Для этого у кругломеров в схеме преобразования сигнала измерительной головки предусматриваются частотные фильтры, включая которые можно дифференцированно регистрировать различные по частоте участки спектра от-

клонений формы детали. Согласно ГОСТ 17353-71 каждый кругломер (кроме пневматических) должен иметь не менее двух частотных фильтров. Один из них используется для подавления высокочастотной части спектра и регистрации только низкочастотных составляющих, второй – для подавления низких частот и регистрации высокочастотных неровностей. Верхняя граница полосы пропускания первого из обязательных фильтров соответствует 15 неровностям на окружности детали, и эта же частота соответствует нижней границе полосы пропускания второго обязательного фильтра. В тех случаях, когда в приборе имеется больше двух фильтров, границы полос пропускания частот рекомендуется выбирать из следующего ряда: 1; 1,67; 5; 15; 50; 150; 400; 500. Число 1,67 введено в этот ряд в качестве границы фильтра, подавляющего первую гармонику сигнала, обусловленную эксцентриситетом детали относительно оси вращения шпинделя кругломера. Реального числа неровностей на окружности эта цифра, естественно, не представляет. Больше всего в практике распространены фильтры с границами $\Gamma - 15; 1 - 50; 15 - N$, где N – максимальное число неровностей на окружности, регистрируемое прибором. У некоторых приборов с двумя или более рабочими скоростями вращения шпинделя число выделяемых диапазонов неровностей соответственно больше. Это объясняется уже отмечавшейся выше зависимостью частоты, генерируемой определенным числом неровностей на окружности детали, от скорости вращения шпинделя. Если, например, в электронной схеме кругломера имеется фильтр, настроенный на подавление частот от $f_{гр}$ и выше, то его верхняя граница в числах неровностей на оборот определится как $N = f_{гр} \cdot 60 / n$, где n – число оборотов шпинделя в минуту. Если у кругломера две скорости вращения шпинделя, то, меняя n , можно с помощью одного и того же фильтра выделить два различных диапазона неровностей.

Регистрирующий прибор-самописец является последним звеном преобразования сигнала измерительной головки, с его помощью погрешности формы проверяемой детали регистрируются в виде кривой на диаграммной бумаге. Измерительная система самописцев представляет собой магнитоэлектрический микроамперметр с подвижной рамкой и наружным магнитом. Здесь мы коснемся только тех вопросов, которые специфичны для самописцев, используемых в кругломерах. В зависимости от системы координат, в ко-

торой производится запись, самописцы кругломеров делятся на полярные, прямоугольные и комбинированные или универсальные. В подавляющем большинстве приборов используются полярные самописцы. По способу записи различают чернильные и электротермические самописцы. У первых перо представляет собой капиллярную трубку с резервуаром для чернил, у вторых – металлический стержень, имеющий на конце тонкую проволочку, которой иногда придают форму петли. Для электротермической записи применяется специальная бумага, одна из сторон которой графитизирована. Этой стороной бумага касается металлического лотка самописца. На перо, контактирующее со второй, диаграммной, стороной бумаги, в момент записи подается высокое напряжение (порядка 300 В), в результате чего кончик пера прожигает на бумаге тонкую линию, четко выделяющуюся на светлом фоне. Толщину записи регулируют потенциометром, встроенным в блок усилителя кругломера. Для уменьшения влияния трения пера о бумагу в некоторых моделях приборов на рамку дополнительно подается высокочастотный сигнал очень небольшой амплитуды так, что перо постоянно колеблется относительно бумаги. Визуально эти колебания незаметны, но они исключают влияние на точность записи момента (перехода от трения покоя к трению скольжения). Самописцы с электротермической записью намного удобнее чернильных, которые применяются только в старых моделях кругломеров. Для записи в полярных координатах используется бумага в форме круглого диска с небольшим отверстием в центре. На рабочей стороне диска наносится сетка из двух концентричных окружностей и радиальных лучей. Одна из окружностей расположена вблизи периферии диска, а вторая ограничивает центральный круг диаметром 20 – 30 мм. Зона между этими окружностями предназначена для записи круглограммы. Радиальными лучами она разбита на двенадцать или более равных секторов. Внутри зоны записи нанесена шкала или в виде тонких концентрических окружностей, или в виде делений на радиальных лучах. В центральном круге выделены сегменты для записи названия детали, значения увеличения и индекса фильтра, на которые был настроен прибор во время измерения. Размеры диаграммного диска должны быть согласованы с основными техническими характеристиками прибора: пределами измерения, увеличением и общей частотной характеристикой. Если, например, прибор позволяет за-

писать до 500 неровностей на окружности, то размер диска должен быть таким, чтобы шаг этих неровностей был бы порядка 1 мм, иначе их трудно увидеть на записи. У некоторых приборов (английские кругломеры «Талиронд») это соотношение не выдержано, и поэтому реализовать полностью возможности измерительной схемы практически нельзя. Для записи в прямоугольных координатах используются самописцы и бумажные диаграммные ленты, применяемые в приборах для контроля шероховатости поверхности.

Перо самописца устанавливается на рамке, совершающей вращательное движение. Поэтому, если не принять специальных мер, запись, выполненная на плоском диске или плоской ленте, будет криволинейной. В прецизионных кругломерах такая запись неприемлема, так как она вызывает затруднения при расшифровке и числовой оценке отклонений. Чтобы выпрямить запись, бумагу располагают в плоскости, параллельной оси вращения пера, и участок, на котором производится запись, пропускают через паз, имеющий форму кольцевого сегмента, концентричного оси вращения пера. Средний радиус паза равен расстоянию от наконечника пера до оси вращения. У полярных самописцев паз образуется цилиндрическим лотком и рычагом, прижимающим бумагу к вращающемуся диску, у прямоугольных — лотком и шаблоном, прикрепленным к крышке корпуса. Проходя через паз, бумага принимает его форму, и запись выполняется без искривления. Аналогичный результат можно получить, выполнив перо самописца состоящим из двух звеньев, соединенных шарниром. Первое звено закрепляется на рамке приблизительно перпендикулярно к оси ее вращения, второе звено благодаря шарниру имеет возможность поворачиваться вокруг оси, перпендикулярной к плоскости, в которой лежат ось вращения рамки и первое звено. Длины звеньев подбираются так, чтобы при среднем положении рамки наконечник пера контактировал с бумагой в середине зоны записи, а второе звено располагалось по отношению к первому под углом, близким к прямому. Когда рамка поворачивается, шарнир одновременно с поворотом поднимается над плоскостью бумаги, угол между звеньями пера увеличивается и соответственно увеличивается расстояние от присоединенного к рамке конца первого звена до наконечника пера. В связи с этим запись остается прямолинейной. Такая конструкция делает изгиб бумаги ненужным. При больших размерах бумаги, когда изогнуть ее на отдельном уча-

стке сложно, предпочтительна конструкция с шарнирным пером.

Одним из важных требований, предъявляемых к самописцам кругломеров, является постоянство скорости движения диаграммной бумаги. У самописцев с прямоугольной системой записи скоростью движения ленты определяется горизонтальный масштаб и его стабильность. У полярных самописцев диаграммный диск должен вращаться не только с постоянной скоростью, но и строго синхронно с вращением шпинделя. При полной синхронизации каждая точка круглограммы будет точно совпадать по своему угловому положению с соответствующей точкой профиля проверяемой детали. Если скорость диаграммного диска отличается от скорости вращения шпинделя на $\pm a$ %, то погрешность углового положения текущей точки записи составит $\varphi_3 \cdot a / 100$, где φ_3 – текущий угол поворота диска. К моменту завершения полного оборота, когда $\varphi_{\min} = 2\pi$, диаграммный диск повернется на угол $2\pi (1 \pm a / 100)$, и на записи получится разрыв или перебег, равный $2\pi a \cdot R_3 / 12$, где R_3 – радиус записи. Несовпадение концов записи ограничивается допуском Δ_3 , а соответствующее допустимое расхождение скоростей вращения шпинделя и диаграммного диска можно найти из соотношения $a_{\text{доп}} = \pm 100 \cdot \Delta_3 / (2\pi \cdot R_3)$, %.

У современных кругломеров указанные скорости должны быть синхронизированы с точностью сотых долей процента (0,03 – 0,05 %). Эта задача решается тремя путями: применением для шпинделя и самописца общего привода, использованием отдельных синхронных двигателей и применением сельсинной связи шпинделя и самописца. Примером реализации первого способа могут служить конструкции привода кругломеров завода «Калибр» и английских кругломеров «Талиронд-50», «Талиронд-51» и «Талиронд-2». Самописцы этих приборов размещаются на шпиндельной бабке или на станине вблизи шпинделя. Привод обеспечивается одним электродвигателем через коробку скоростей, соединенную карданными валиками со шпинделем и самописцем. Колебания скорости электродвигателя, если таковые имеют место, одинаково сказываются на вращении шпинделя и диаграммного диска, так что синхронность их движения не нарушается. Более целесообразно, однако, выполнять самописец в виде отдельного самостоятельного узла, механически со шпинделем не связанного. Это позволяет расположить его в наиболее удобном для оператора месте и тем самым спо-

способствует повышению производительности измерений. Такое решение облегчает также применение стандартных самописцев, выпускаемых специализированными предприятиями. Точное совпадение скоростей шпинделя и самописца обеспечивается в этом случае синхронными электродвигателями, применяемыми в приводах обоих узлов (кругломеры ВЕ-20, ВЕ-37, «Талиронд-200», «Талиронд-73», «Талиронд-3»), или сельсинами (кругломер «Формтестер»).

Запись отклонений от круглости, определяемых измерительной головкой кругломера, должна выполняться в течение одного оборота шпинделя, а затем прекращаться. При этом желательно, чтобы прекращение записи не было связано с полным выключением привода, так как частые пуски и остановки неблагоприятно сказываются и на точности (нарушение установившегося теплового режима), и на долговечности прибора. Самописцы с электротермической записью позволяют сравнительно просто обеспечить отсечку одного оборота на записи путем управления подачей высокого напряжения на перо. В цепи «напряжения записи» устанавливается контакт, который замыкается в начале оборота и размыкается после того, как шпиндель повернулся ровно на 360° . Схема одного из вариантов механизма, управляющего этим контактом, показана на рис. 95, а. На валу 8 (любой вал системы привода, вращающийся со скоростью шпинделя) установлена по свободной посадке втулка 9. Плоской пружиной 6, усилие которой регулируется гайкой 7, втулка поджата к торцу бурта 5 вала 8. Во втулке имеется шпоночный паз, к которому пригнана с очень малым зазором шпонка, закрепленная на рычаге 3. Рычаг, установленный на оси 4, поджат ко втулке пружиной и сцеплен с сердечником соленоида 2. В положении, изображенном на рисунке, тока в обмотке соленоида нет, его сердечник находится в нижнем положении, под действием пружины 10 шпонка рычага запала в паз втулки и удерживает ее от поворота при вращении вала 8. Контакт 1, входящий в цепь «напряжения записи», разомкнут под действием пружины 11. Для того чтобы произвести запись, оператор нажимает кнопку «запись» на пульте управления и тем самым замыкает цепь питания соленоида. Сердечник соленоида поднимает вверх рычаг 3 со шпонкой, контакт 1 замыкается и начинается запись. Одновременно, как только шпонка выходит из паза втулки, последняя начинает вращаться вместе с валом 8, увлекаемая силой трения о торец бурта 5. Тем временем оператор отпускает кнопку, и соленоид отключается: пружина 10 стремится опустить рычаг, но

шпонка, опираясь на наружную поверхность втулки 9, удерживает его в верхнем положении.

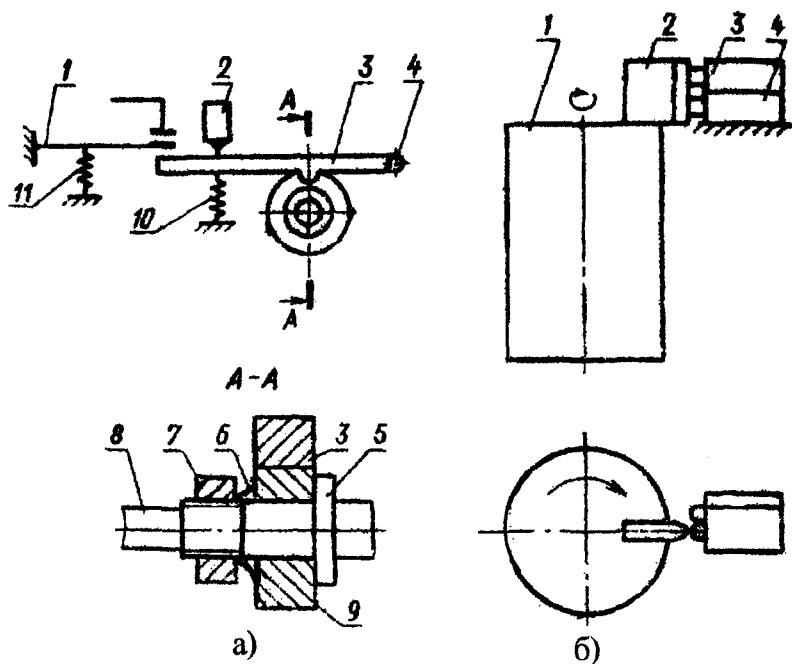


Рис. 95

Контакт 1 остается замкнутым. Это положение сохраняется до тех пор, пока втулка 9 не совершит полный оборот. В момент завершения оборота шпонка западет в паз, контакт 1 разомкнется, запись прекратится и втулка остановится до следующего нажима на кнопку «запись». Схема другого варианта отсечки одного оборота приведена на рис. 95, б. Здесь на шпинделе 1 или другом звене привода, имеющем ту же угловую скорость, что и шпиндель, установлен кулачок 2, взаимодействующий с двумя микропереключателями 3 и 4. При нажиме на один из них (на схеме микропереключатель 4) запись начнется, а при нажиме на второй – прекращается. Кнопка «запись» на пульте управления выполняет в этом случае вспомогательные функции – она подготавливает цепь к срабатыванию микропереключателей. Вместо микропереключателей и кулачка могут использоваться магнитные контакты и встроенный в шейку шпинделя магнит. Рас-

смотренная система удобна тем, что запись начинается всегда при одном и том же угловом положении шпинделя, поэтому точка начала записи может служить указателем при ориентации круглограммы относительно проверявшегося сечения детали. В некоторых угломерах используется комбинация рассмотренных выше схем: отсечка одного оборота осуществляется механизмом с рычагом и соленоидом, а его включение — магнитным контактом, установленным на шпинделе (приборы «Талиронд-200», «Талиронд-73» и «Талиронд-3»). В этой модели самописца имеется также магнитная муфта, расположенная между выходным валом редуктора электродвигателя и валом, вращающим диаграммный диск. Электродвигатель работает постоянно, а диаграммный диск вращается только во время записи. В остальное время бумага остается неподвижной, и менять ее удобнее, чем у самописцев с постоянно вращающимся диском.

Общим и очень важным для применяемых в кругломерах записывающих устройств всех типов параметром является граница частотного диапазона сигналов, регистрируемых без существенных амплитудных или фазовых искажений. В этом отношении самописцы являются сегодня тем звеном системы преобразования сигнала, которое лимитирует частотную характеристику кругломера в целом. Наиболее совершенные модели применяемых записывающих приборов позволяют регистрировать сигнал с частотой не более 50 Гц. Ряд моделей работает в пределах до 20 – 25, а многие — до 6 – 8 Гц. Учитывая, что кругломер должен регистрировать не менее определенного числа N неровностей на окружности проверяемой детали, можно установить связь между предельной частотой регистрации $f_{пр}$ и допустимой скоростью измерения, т. е. скоростью вращения шпинделя прибора $n = S_{пр.р} \cdot 60 / N$, об/мин. По ГОСТ 17353-71 кругломеры должны регистрировать не менее 150 неровностей за оборот. При граничной частоте регистрации 6 Гц это означает, что шпиндель должен вращаться со скоростью не более 2,4 об/мин. Если ориентироваться на измерение 500 неровностей за оборот (наибольшее число из стандартного ряда) и самописец с $f_{пр}$, равной 25 Гц, предельная скорость шпинделя составит 3 об/мин. Конструкции шпинделей прецизионных кругломеров, рассмотренные выше, могут работать при значительно больших скоростях вращения, что обеспечило бы более высокую производительность контроля. Поэтому разработка новых конструкций самописцев, способных реги-

стрировать сигналы с частотой до 100 – 150 Гц, является актуальной проблемой на пути совершенствования приборов для контроля точности формы деталей.

Амплитудно-частотная характеристика самописца снимается обычно низкочастотным генератором синусоидальных сигналов известной амплитуды, подаваемых на выходной каскад усилителя или, если генератор достаточно мощный, непосредственно на рамку записывающего прибора. Амплитуду сигнала подбирают таким образом, чтобы при его регистрации использовалось примерно $2/3$ зоны записи. На каждой частоте сопоставляют амплитуду входного сигнала и амплитуду A , зарегистрированную самописцем. По результатам строят график, аналогичный графику амплитудно-частотной характеристики фильтра. Для проверки линейности самописца на него (обычно тоже через выходной каскад усилителя) подают ступенчатый сигнал, причем размер каждой «ступеньки» отсчитывается по цифровому вольтметру постоянного тока. Разрешающая способность вольтметра должна быть больше, чем требуемая точность проверки. Для выявления погрешности от гистерезиса подается переменный по направлению ступенчатый сигнал. Чтобы уменьшить влияние трения пера о бумагу, на основной сигнал дополнительно накладывают небольшой по амплитуде сигнал, частота которого заведомо больше предельной частоты, регистрируемой самописцем. По результатам проверки линейности строится график, где по оси абсцисс откладываются показания вольтметра, по оси ординат – величины, регистрируемые самописцем. По внешнему виду такой график напоминает амплитудную характеристику измерительной головки.

5. ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Отклонение формы есть отклонение формы реальной поверхности или реального профиля от формы геометрической поверхности или геометрического профиля.

Отклонение формы плоских поверхностей характеризуется или прямолинейностью или плоскостностью.

Непрямолинейность – наибольшее расстояние от точек реального профиля до геометрического.

Неплоскостность – наибольшее расстояние от точек реальной поверхности до геометрической.

В зависимости от того, на каком физическом явлении основано создание исходных прямых и плоскостей, от которых определяют значение непрямолинейности и неплоскостности, имеют место следующие принципы измерения: механические, гидростатические, оптико-механические, оптические (рис. 96).

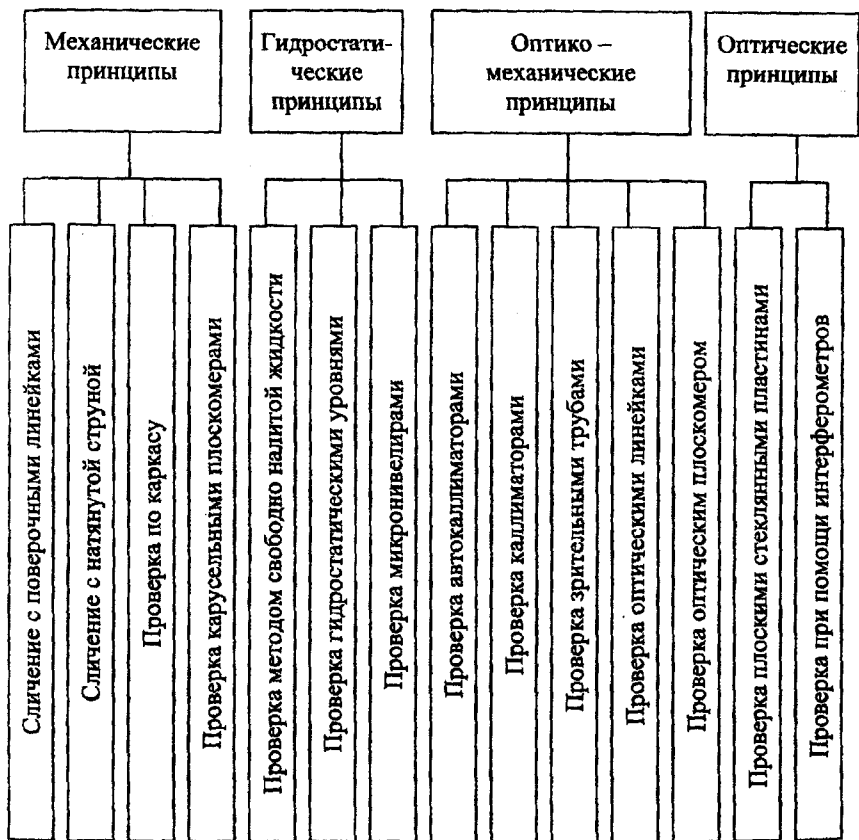


Рис. 96

Рассмотрим в отдельности эти принципы измерения.

Механические принципы измерения

В соответствии с ГОСТ 8026-64 поверочные линейки изготавливают следующих типов:

- лекальные с двусторонним скосом (ЛД);
- лекальные трехгранные (ЛТ);
- лекальные четырехгранные (ЛЧ);
- поверочные линейки с широкой рабочей поверхностью прямоугольного сечения (ЩД) и двутаврового сечения (ШД);
- поверочные линейки с широкой рабочей поверхностью – мостики (ШМ);
- поверочные линейки угловые трехгранные (УТ).

Для лекальных линеек – два класса точности (0 и 1), для поверочных – три класса точности (0; 1 и 2).

Плиты изготавливают из чугуна с шаброванными и нешаброванными (шлифованными или строганными) рабочими поверхностями или из гранита.

Сущность метода поверки с помощью лекальных и поверочных линеек и плит заключается в том, что проверяемую поверхность детали сличают с их рабочими поверхностями.

Рабочее ребро лекальной линейки помещают на проверяемую поверхность и на глаз оценивают просвет между ними. Невооруженным глазом можно обнаружить просвет в 1-2 мкм. Для более точной оценки просвета используют образец просвета (рис. 97), состоящий из концевых мер 1 различных размеров и притертых к стеклянной пластине 3, и лекальной линейки 2, опирающейся на две крайние меры одинакового размера.

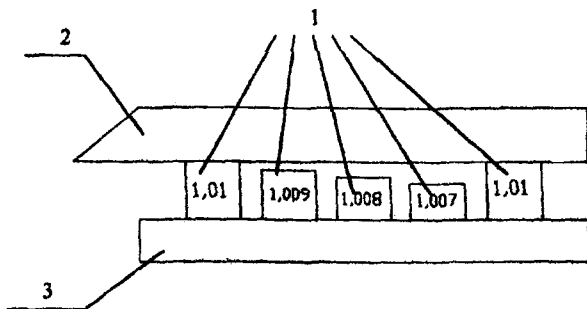


Рис. 97. Образец просвета

На рис. 98 показано определение непрямолинейности с помощью поверочной линейки и концевых мер. Две концевые меры одинакового номинального размера устанавливают под отметки линейки соответствующими точками номинального прогиба.

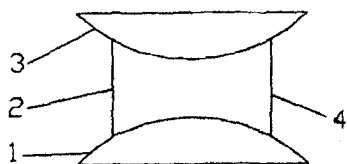


Рис. 98. Определение непрямолинейности с помощью поверочной линейки и концевых мер:

1 – проверяемая поверхность; 2, 4 – концевые меры;
3 – исходная поверхность линейки

Измерение непрямолинейности сличением с натянутой струной (рис. 99).

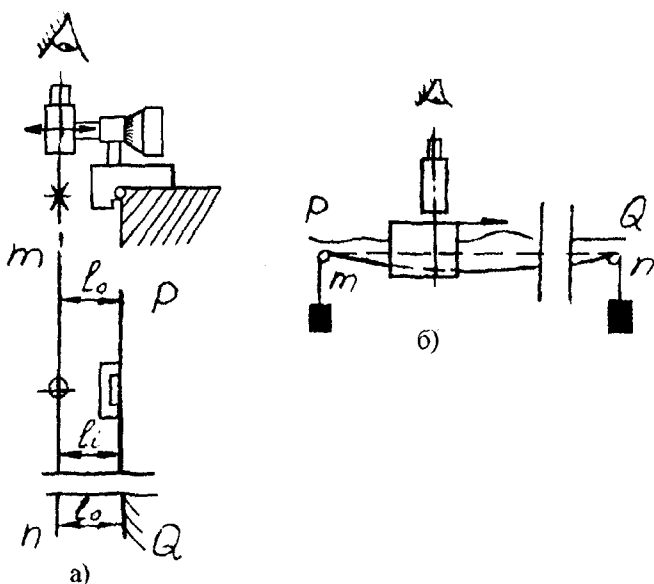


Рис. 99. Схема проверки непрямолинейности сличением с натянутой струной:
а) – вертикальных поверхностей; б) – горизонтальных поверхностей

В данном случае исходной прямой является струна, натянутая параллельно контролируемой поверхности.

Определяют расстояние l_i от струны mn до проверяемой поверхности PQ . В качестве отсчетного устройства чаще всего используют микроскоп.

Сличение с натянутой струной рекомендуется применять для проверки непрямолинейности вертикальных поверхностей, т. к. при измерении горизонтальных поверхностей вносится погрешность за счет прогиба струны.

Оценка плоскостности методом «пятен на краску»

Шаброванные плиты и линейки типа ШИМ широко применяют в качестве образцовых поверхностей при оценке плоскостности по методу «пятен на краску». Для этого исходную поверхность покрывают тонким слоем краски и соприкасают с проверяемой поверхностью. Размер исходной поверхности должен быть не меньше проверяемой.

При соприкосновении краска переносится на более высокие участки поверхности, поэтому по распределению окрашенных пятен можно судить о характере рельефа поверхности, хотя невозможно определить числовое значение отклонений.

5.1. Измерение плоскостности сферометрами и карусельными плоскомерами

Сферометры и карусельные плоскомеры дают возможность определить числовое значение отклонений от плоскостности непосредственно по отсчетному устройству.

Сферометр (рис. 100) состоит из корпуса 1 с тремя жесткими опорами 2, 3 и 4, образующими исходную плоскость. В центре корпуса помещен микрометрический винт 5 (отсчетное устройство). Перед измерением сферометр располагают на плоской стеклянной пластине или поверочной плите класса 0, наконечник микровинта соприкасают с плоскостью и устанавливают на нуль. Затем сферометр переносят на проверяемую поверхность и снимают показания микровинта в момент соприкосновения его с проверяемой поверхностью. Недостаток: отклонение от плоскостности можно получить

только для одной центральной точки поверхности. На точность влияют: неплоскостность поверхности, по которой микровинт устанавливали на нуль, и точность отсчетного устройства.

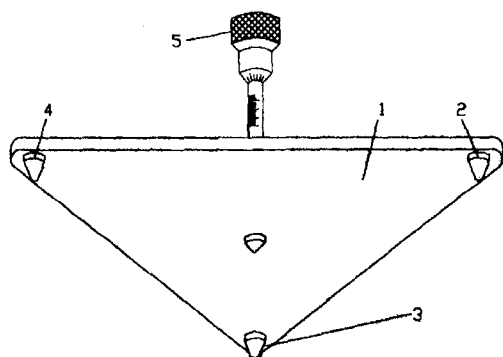


Рис. 100. Сферометр

На рис.101 показана схема карусельного плоскомера. Прибор позволяет измерять отклонения от плоскостности, в которой рычаг 1 вращается вместе с измерительным показывающим прибором.

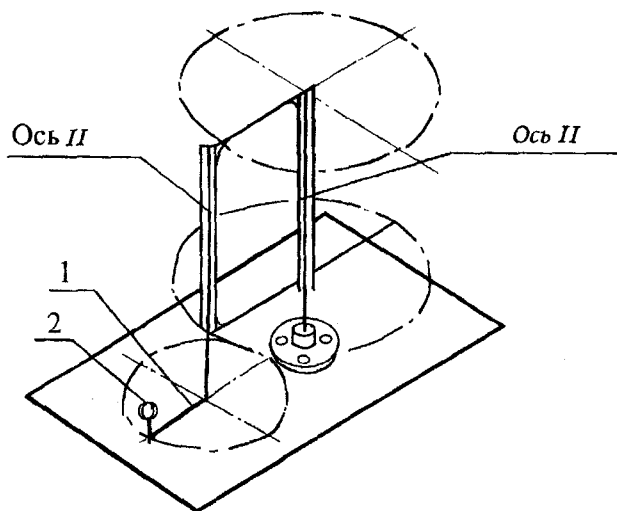


Рис. 101. Схема карусельного плоскомера

Плоскомер устанавливают в середине проверяемой поверхности, на которой произвольно выбирают три базовые точки, определяющие исходную плоскость. Регулировочными винтами, вмонтированными в основание прибора, добиваются, чтобы показания прибора в этих точках были равны нулю. Затем на поверхности отмечают точки, в которых должны быть проведены измерения, и определяют отклонения в этих точках от исходной плоскости. Перемещение измерительного прибора в одной плоскости обеспечивается вращением его вокруг двух строго параллельных осей I и II и отсутствием осевого биения.

5.2. Гидростатические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности

5.2.1. Метод измерения с помощью свободно налитой жидкости

При измерении непрямолинейности резервуар с жидкостью устанавливают рядом с проверяемой поверхностью, на которую помещают стойку с микрометрической головкой, имеющей наконечник в виде иглы. Стойку перемещают последовательно в намеченные точки проверяемой поверхности и каждый раз иглу приводят в контакт с поверхностью жидкости и проводят отсчет по микровинту. Аналогично измеряют неплоскостность, только при этом резервуар с жидкостью устанавливают непосредственно на проверяемую поверхность.

Точность измерения невысока. Погрешность составляет не менее 0,1 мм. Этот метод в настоящее время применяют редко из-за низкой точности и громоздкости измерительной установки.

5.2.2. Метод измерения с помощью сообщающихся сосудов

Этот метод измерения значительно точнее, чем предыдущий. В основу его положено свойство жидкости устанавливаться в сообщающихся сосудах на одном уровне.

Сообщающиеся сосуды могут быть открытыми и закрытыми. На рис. 102 показаны гидростатические закрытые уровни. В измерительную головку 3 вмонтирован микрометрический глубиномер 1. Нижние части головок соединены между собой с помощью шлангов 4. Соединенные верхними шлангами 2 верхние полости резервуаров образуют

общую воздушную систему, в которой устанавливается одинаковое давление воздуха.

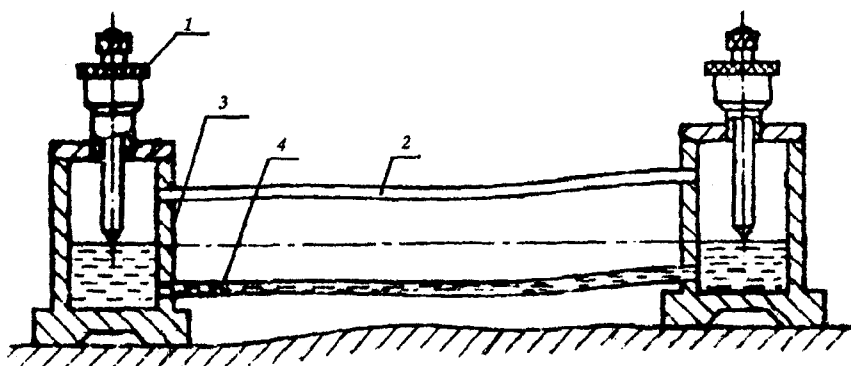


Рис. 102. Гидростатические закрытые уровни

Измерение двумя головками проводят следующим образом. Одну из головок помещают на первую проверяемую точку поверхности, вторую головку последовательно на все остальные проверяемые точки и каждый раз снимают отсчеты по микровинтам. По разности показаний микровинтов можно судить о непрямолинейности или неплоскостности.

5.2.3. Метод измерения с помощью уровней

Уровни представляют собой ампулу, наполненную жидкостью, в которой оставлен пузырек воздуха. Ампула заключена в специальную оправу, устанавливаемую на две опоры. Все устройство носит название микрошлифа (рис. 103).

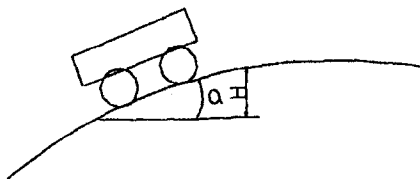


Рис. 103

Перед измерением поверхность разбивают на участки. Зная угол и расстояние между головками, можно найти H . Затем дальше передвигаем уровень. Успешно используются также электронные уровни, в которых кроме пузырька применяется и маятник.

5.3. Оптико-механические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности

Сущность оптико-механических принципов измерения непрямолинейности заключается в том, что профиль проверяемой поверхности сравнивают с лучом света (оптической осью), который распространяется прямолинейно и, следовательно, может быть принят за исходную прямую.

5.3.1. Автоколлимационный и коллимационный методы

При проверке непрямолинейности автоколлимационным и коллимационным методами измеряют углы наклона последовательно расположенных участков, равных шагу измерения l , по отношению к исходной прямой, заданной оптической осью трубы (рис. 104).

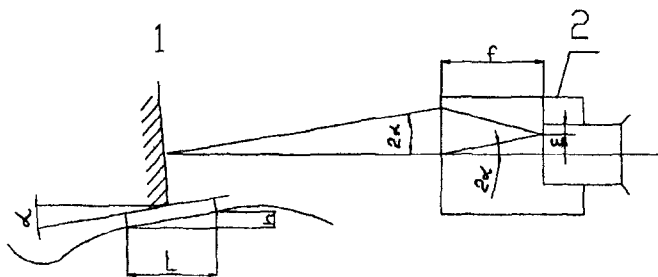


Рис. 104. Принципиальная схема автоколлиматора

При наклоне зеркала 1 на угол α отраженный луч возвращается в автоколлиматор 2 под углом 2α , что вызывает смещение изображения светящейся марки на отсчетной шкале, расположенной в фокальной плоскости окулятора автоколлиматора, на величину ϵ . Из рис. 104 видно, что $\epsilon = f \cdot \text{tg} 2\alpha$, f – фокусное расстояние объекти-

ва автоколлиматора. Так как углы малы, то $tg2\alpha \approx 2\alpha$ и $\varepsilon = 2f \cdot \alpha$.

Из рис. 104 также видно, что

$$tg\alpha = \frac{h}{L} \text{ или } \alpha \approx \frac{h}{L},$$

где h – разность высот двух соседних проверяемых точек;

L – шаг измерения.

Получаем, что

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot f \cdot h}{L}.$$

Таким образом, при измерении автоколлиматором чувствительность определяется лишь фокусным расстоянием объектива и шагом измерения. Погрешность Δ выражается формулой

$$\Delta = \sqrt{A \cdot l \cdot L + 0,0002 \cdot \frac{H^2}{L}}, \text{ мкм,}$$

где l – шаг измерения, м;

L – длина проверяемой поверхности, м;

H – отклонение от прямолинейности, мкм;

A – коэффициент, зависящий от цены деления шкалы автоколлиматора.

5.3.2. Метод визирования с помощью зрительных труб

Сущность метода визирования заключается в измерении расстояния от проверяемой поверхности до оптической оси зрительной трубы, принятой за исходную прямую.

Измерения производят с помощью зрительной трубы 2 и визирной марки 1 (рис. 105) следующим образом. Зрительную трубу помещают на проверяемую поверхность или рядом с ней. Визирную ось зрительной трубы устанавливают параллельно прямой, прохо-

дящей через крайние точки OO проверяемой поверхности. При этом отсчеты X_0 и X_n в этих точках будут одинаковыми.

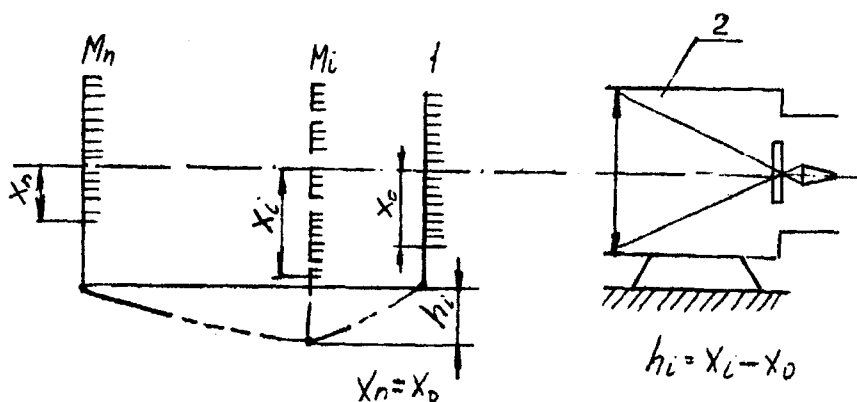


Рис. 105. Схема проверки непрямолинейности методом визирования

Затем визирную марку помещают последовательно во все проверяемые точки и производят каждый раз отсчеты X_i по оптическому микрометру зрительной трубы. Разность отсчетов ($X_i - X_0$) будет равна отклонениям h_i соответствующих точек проверяемого профиля от прямой, соединяющей крайние его точки. Большим преимуществом визирного метода по сравнению с автоколлимационным является то, что он не требует сложной обработки результатов измерений. Однако недостаток его заключается в необходимости перефокусировки при изменении расстояния между зрительной трубой и маркой. Это изменяет цену деления осчетного устройства и может привести к смещению исходной прямой, что вносит дополнительные погрешности в результаты измерения. Этот недостаток можно устранить, применяя различные оптические схемы зрительных труб.

Рассмотрим оптическую схему зрительной трубы ППС-11 (рис. 106).

Объект, который может находиться на любом расстоянии от зрительной трубы, проецируется объективом 2 и фокусирующей линзой 3 в плоскость сетки 4. Оборачивающая система 5 и окуляр 6 образуют микроскоп, в котором рассматривают сфокусированное на сетке изображение объекта. Смещение изображения объекта отно-

нительно оптической оси зрительной трубы измеряют оптическим микрометром, состоящим из плоскопараллельной пластины 1 и отсчетных барабанов. Зрительную трубу можно использовать как автоколлиматор, если подсветить сетку 4 источником света 8, свет от которого проходит к конденсатору 9, зеркалу 10 и полупрозрачной пластине 7.

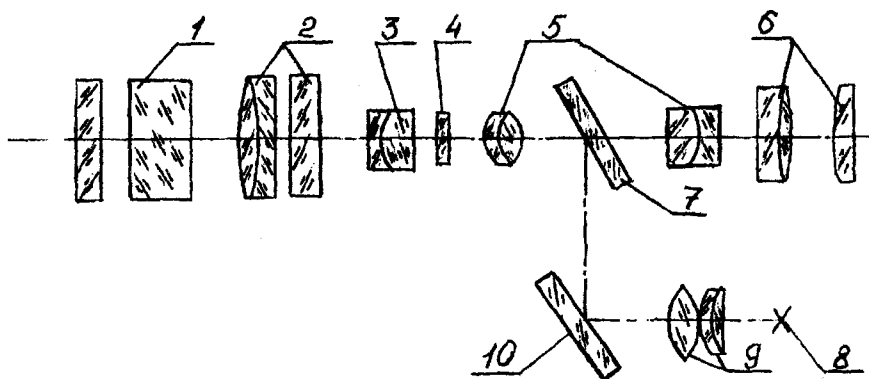


Рис. 106. Оптическая схема зрительной трубы

Погрешность зрительной трубы $\pm(10+5L)$, мкм, где первый член характеризует погрешности самого прибора, а второй зависит от измеряемой длины L , м.

На рис. 107 представлена схема оптической струны ДП-477. Оптическая струна состоит из марки и визирной трубы. Нить лампы 1 проецируется коллектором 2 на точечную диафрагму 3.

Визирная труба II состоит из объектива 5, обладающего свойствами аксикона, и наблюдательного микроскопа III. Поскольку объектив имеет свойства аксикона, исключается необходимость перефокусировки. Изображение диафрагмы 3 марки проецируется объективом 5 в предметную плоскость микроскопа III, микрообъектив 6 и преломляющую призму 9, которая переносит изображение в плоскость окулярной сетки 8, где его рассматривают в окуляре 7.

Плоскопараллельная пластина 4 является оптическим компенсатором. Наклоны ее позволяют измерять смещение точечной диафрагмы 3 относительно оптической оси.

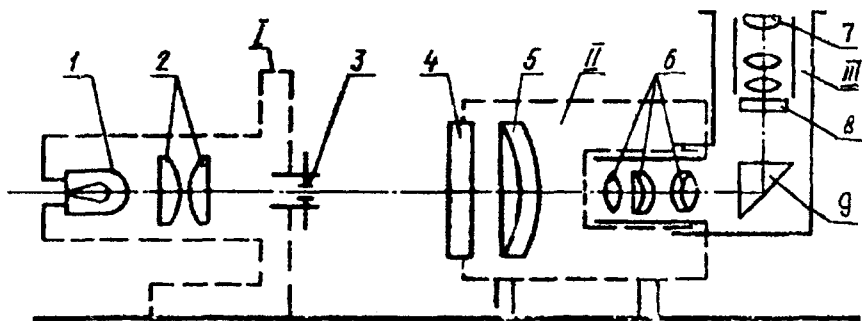


Рис. 107. Схема оптической струны ДП-477

При измерении марку перемещают вдоль проверяемой поверхности. Из-за непрямолинейности поверхности точечная диафрагма смещается относительно оси, что вызывает смещение ее изображения в предметной плоскости микроскопа III и в плоскости окулярной сетки 8. Вращая микровинт и наклоняя пластину 4, совмещают изображения диафрагмы со штрихом сетки и производят отсчет по барабану винта в микрометрах.

5.4. Оптические линейки

Принцип действия оптической линейки основан на измерении отклонений профиля проверяемой поверхности от профиля исходной прямой, заданной лучом, проходящим через центры зеркально-линзовых объективов, образующих афокальную автоколлимационную систему.

Наиболее широко распространены оптические линейки типов ИС-43 и ИС-36. Принципиальная схема линейки представлена на рис. 108.

Лучи света от лампочки 6, пройдя через призму 5, линзу 4, призму 17 и левую половину кубика 12, освещают визирную марку 2 и через зеркально-линзовые объективы 1 и 13 создают изображение визирной марки 2 на полевой диафрагме 3. Микрообъектив 11 переносит увеличенное изображение визирной марки 2 в плоскость биссекторной сетки 7. Проекционный окуляр 9 проецирует биссектор и изображение визирной марки 2 в плоскость экрана, совмещенную с коллективом 8.

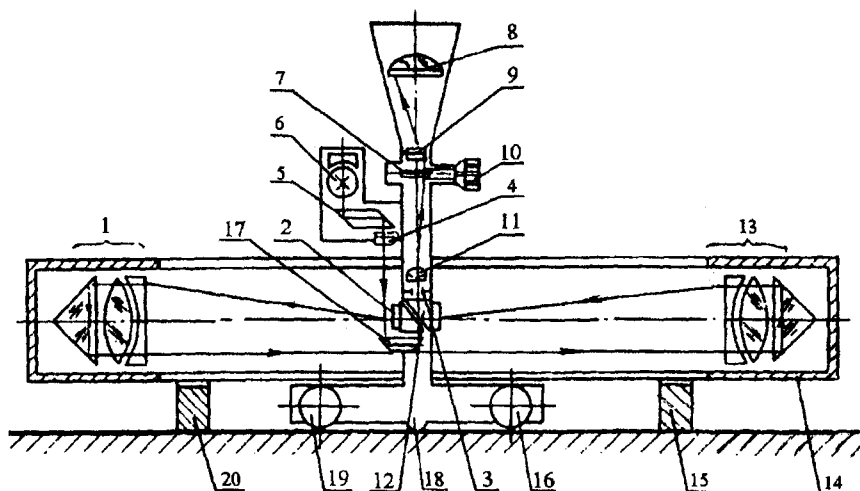


Рис. 108. Схема оптических линейек

Объективы 1 и 13 образуют автоколлимационную афокальную систему с увеличением $\beta = -1^{\times}$. Афокальная система обладает тем свойством, что расстояние вдоль оси системы между предметом и его изображением постоянно и не зависит от положения предмета на оси. Поэтому положение визирной марки при движении измерительной каретки вдоль оси всегда остается резким на экране проекционного окуляра. Смещение шупа 18 измерительной каретки, возникающее из-за непрямолинейности проверяемого профиля, вызывает смещение изображения визирного штриха относительно изображения биссектора. Это смещение измеряют по барабану отсчетного устройства с ценой деления 0,001 мм.

Основными узлами прибора являются корпус 14 и измерительная каретка, перемещающаяся по проверяемой поверхности на роликах 16 и 19. В корпус вмонтирована оптическая часть прибора, а каретка содержит осветительную и измерительную его части. В верхней части каретки установлен проекционный микроскоп, состоящий из микрообъектива 11, винтового окулярного микрометра 10 и проекционного окуляра. В этот окуляр входят объектив 9 с увеличением 3^{\times} и плоско-выпуклый коллектив 8.

Для установки линейки на проверяемую плоскость служат опоры 15 и 20. Опоры создают трехточечную установку линейки, т. к. одна из опор имеет две точки касания с проверяемой плоскостью.

Недостатки: невозможность измерений в вертикальной плоскости и большая масса каретки и корпуса у линейки ИС-36.

Определение непрямолинейности и неплоскостности с помощью автоколлиматоров и зрительных труб связано с большой трудоемкостью как при производстве измерений, так и при обработке полученных результатов. Поэтому в последнее время стали появляться плоскомеры, позволяющие непосредственно измерять отклонения от исходной плоскости. На рис. 109 показана схема оптического плоскомера.

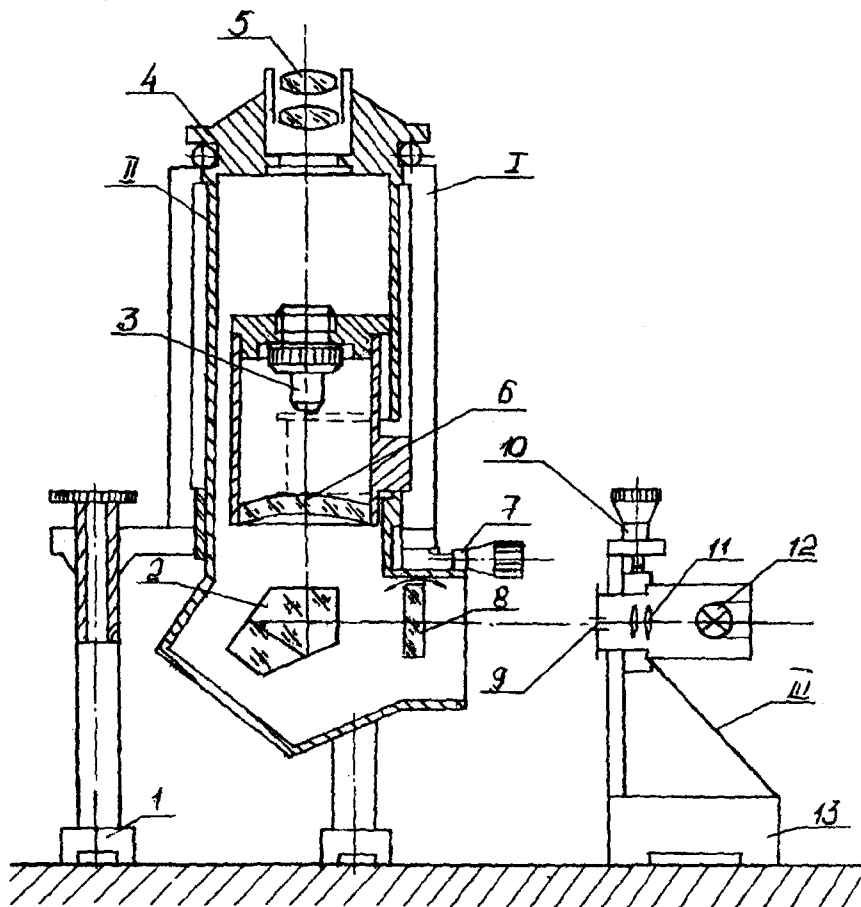


Рис. 109. Оптический плоскомер

Плоскомер состоит из двух частей: неподвижной I и подвижной II. На неподвижной части прибора закреплен объектив 6 в виде сферического мениска и микрообъектив 3. В поворотную часть прибора входят окуляр 5 с сеткой 4, пентапризма 2 и плоскопараллельная пластина 8. Объектив 6, обладающий свойствами аксиона, служит для получения в предметной плоскости микроскопа изображения светящейся марки, находящейся на любом расстоянии от визирной трубы прибора. Пентапризма преломляет оптическую ось прибора под углом 90° и применяется для получения плоскости визирования при вращении ее вокруг оптической оси. Плоскопараллельная пластина 8 при качении ее вокруг оси позволяет компенсировать совмещение изображения светящейся марки относительно плоскости визирования. Смещение измеряют микровинтом 7. Неподвижная часть прибора установлена на трех регулируемых по высоте опорах с магнитами 1, при включении которых прибор фиксируется на проверяемой поверхности.

Визирная марка III содержит источник света 12, конденсор 11 и точечную диафрагму 9, перемещаемые по высоте микровинтом 10. Визирная марка фиксируется на поверхности постоянным магнитом 13.

Для проверки неплоскостности на проверяемую поверхность устанавливают три одинаковые марки. Регулируя опоры плоскомера, добиваются, чтобы изображения светящихся точек всех трех марок находились в центре перекрестия центра прибора. При этих условиях можно считать, что плоскость визирования прибора является исходной плоскостью. Устанавливая теперь визирную марку в любую точку проверяемой поверхности, можно определить отклонения от исходной плоскости по отсчетному барабану микровинта 7.

5.5. Оптические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности

Оптические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности основаны на применении интерференции. Неплоскостность оценивают по величине искривления интерференционных полос.

Большим преимуществом оптических принципов является то, что они позволяют измерять сразу всю поверхность, а не отдельные локальные участки, и получать исчерпывающую информацию о всей поверхности в целом.

Простейший интерференционный метод основан на наблюдении интерференционных полос, возникающих при наложении на проверяемую поверхность стеклянной пластины, причем если радиус кривизны полос направлен от ребра клина, то проверяемая поверхность имеет выпуклость, если радиус кривизны направлен к ребру клина – то вогнутость.

В настоящее время разработан ряд интерференционных приборов, в которых интерференция возникает в результате наложения плоской волны, идущей от коллиматора, на другую ее часть, отраженную от проверяемой поверхности.

Рассмотрим интерферометр с двойной призмой Кестера, получивший название «интерференционная линейка», принципиальная оптическая схема которой показана на рис. 110.

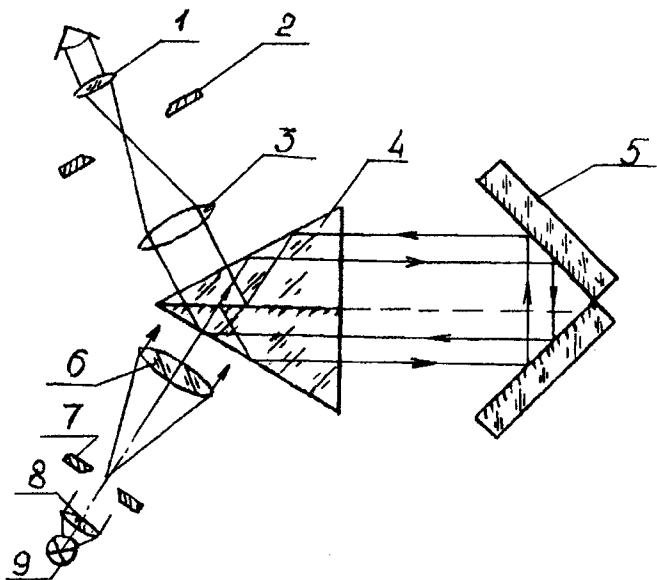


Рис. 110. Принципиальная оптическая схема интерференционной линейки

Лучи от источника света 9, пройдя через конденсор 8, диафрагму 7 и коллимационную линзу 6, параллельным пучком падают на разделительную плоскость призмы 4. Отразившись от противоположных боковых поверхностей призмы, оба пучка лучей попадают на

угловое зеркало 5. После отражения от него лучи возвращаются в призму, вторично отражаются от ее боковых поверхностей и разделительной плоскости и направляются в зрительную трубу, состоящую из объектива 3, шелевой диафрагмы 2 и окуляра 1.

Если угловое зеркало расположено симметрично по отношению к разделительной плоскости призмы, то в поле зрения зрительной трубы видны интерференционные кольца равного наклона.

Угловое зеркало 5 жестко связано с измерительными наконечниками и вмонтировано в специальную оправу, которую можно перемещать по проверяемой поверхности. При наличии непрямолинейности угловое зеркало смещается относительно плоскости симметрии призмы. Это создает разность хода в интерферирующих пучках и приводит к изменению интерференционной картины в поле зрения.

Вместо углового зеркала можно применить тройное зеркало, афокальную систему с зеркальным или обычным объективом, а также устройство, состоящее из двух угловых линз.

На рис. 111 представлена схема лазерного интерферометра.

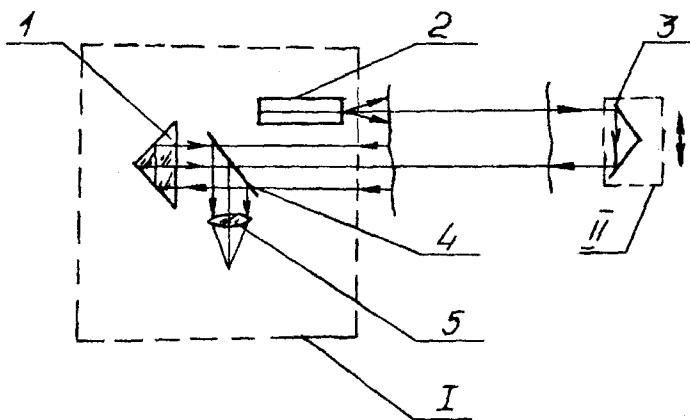


Рис. 111. Принципиальная схема лазерного интерферометра

Прибор состоит из интерферометра I и марки II, связанной с проверяемым объектом. Луч света от источника излучения 2, в качестве которого использован газовый оптический квантовый генератор, попадает на угловое зеркало 3 марки II. Отразившись от него, лучи ОКГ, пройдя пластину 4, частично отражаются от гипотенуз-

ной грани призмы 1, частично – от ее боковых сторон и направляются этой же пластиной в объектив 5, собирающий их в фокальной плоскости.

Благодаря тому, что количество отражений в одном плече интерферометра отличается в нечетное число раз от количества отражений во втором плече, интерферометр реагирует на поперечные смещения источника света в плоскости, перпендикулярной ребру призмы. Призма имеет небольшую пирамидальность, поэтому интерферирующие лучи расходятся под некоторым постоянным углом в плоскости, проходящей через ребро призмы перпендикулярно к ее гипотенузной поверхности. Когда источник света находится в этой плоскости, в поле зрения прибора наблюдают интерференционные полосы постоянной ширины, расположенные перпендикулярно к ребру призмы. Смещение источника света изменяет наклон полос, который для выбранной точки может быть определен по числу полос.

6. ИЗМЕРЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОФИЛЬНЫМ МЕТОДОМ ПРИБОРАМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ

В настоящее время широко распространены и выпускаются серийно контактные (щуповые приборы) профилографы и профилометры системы М.

Профилограф – прибор, регистрирующий координаты профиля. Обычно регистрируют с помощью электрометрического записывающего прибора.

Контактным прибором профилометром системы М называется контактный (щуповой) прибор, служащий для измерения шероховатости поверхности по системе М.

М-профилографы и профилометры относятся к контактным приборам, т. е. к таким, в которых информация поступает от ощупывающего исследуемый профиль щупа (алмазной иглы, имеющей очень небольшой радиус кривизны вершины, чтобы касаться дна впадин неровностей при ощупывании. Радиусы кривизны щупов выбираются из ряда 2 ± 2 , 5 ± 1 , $10\pm 2,5$ мкм по ГОСТ 9017-59).

В зависимости от эксплуатационного назначения профилографы и профилометры подразделяют на 2 типа в зависимости от эксплуатационного назначения:

А – для номинально-прямолинейных профилей;
Б – одной или нескольких номинально-непрямолинейных форм профилей.

В зависимости от параметров метрологических характеристик профилографы и профилометры каждого типа делятся на две группы:

І – для исследования и лабораторных работ повышенной точности;

ІІ – для измерений в процессе послеоперационного контроля.

Допускается конструктивное объединение профилографа и профилометра в одном приборе. Одной из самых основных характеристик профилографов является увеличение, с которым регистрируют координаты профиля поверхности.

V_v – вертикальное увеличение (масштаб преобразования координат профиля в направлении перемещения щупа, нормальном к нормальному профилю поверхности).

V_n – горизонтальное увеличение (масштаб преобразования координат профиля в направлении перемещения щупа вдоль номинального профиля поверхности).

Значения V_v во много раз больше значений V_n . По ГОСТ 19299-73 диапазон значений вертикальных увеличений для профилографов всех типов должен быть от 10^x до 500000^x , а горизонтальных увеличений – от 10^x до 10000^x .

Таким образом, профилограммы не определяют действительного положения точек исследуемого профиля, а как бы «сплющены» в горизонтальном направлении.

6.1. Профилографы и профилометры, выпускаемые серийно

Заводом «Калибр» выпускались следующие модели профилограф-профилометров: 201, 202, 252.

На приборах моделей 201 и 202 можно измерять шероховатость поверхности по интегральному параметру Ra , значения которого определяют по шкале (при использовании в качестве профилометров) или записывают профилограмму поверхности на бумажную ленту в прямоугольных координатах (режим профилографа).

Прибор модели 201 (рис. 112) предназначен для измерения неровностей поверхностей, геометрические профили которых представляют собой прямые линии, т. е. на плоскостях, на образующих гладких цилиндров и конусов и т. д. Прибор относится к типу А1.

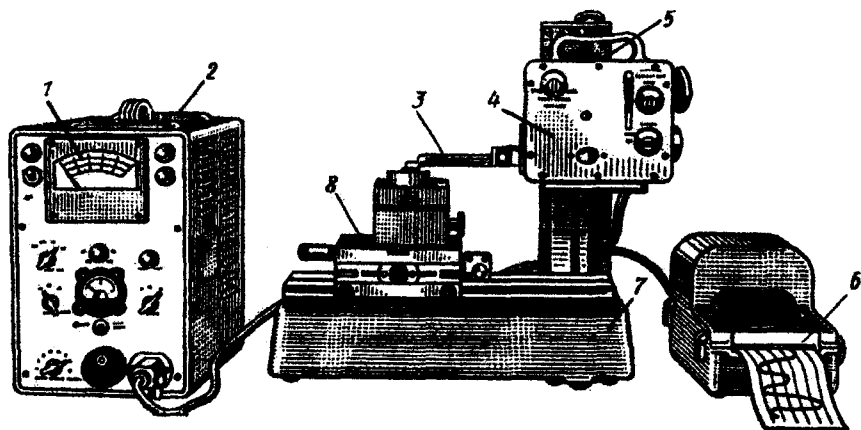


Рис. 112. Профилограф-профилометр модели 201:

- 1 — шкала, по которой отсчитывают параметр Ra ; 2 — электронный блок;
 3 — преобразователь; 4 — мотопривод; 5 — стойка; 6 — записывающий прибор;
 7 — основание; 8 — столик

Прибор модели 202 относится к приборам типа Б1. С его помощью можно измерять не только неровности прямолинейных, но и криволинейных профилей. В комплект прибора входят устройства и приспособления, позволяющие измерять неровности на поверхностях радиусом закругления от 4 до 80 мм, на выпуклых и вогнутых поверхностях шариков и роликов диаметром от 1 до 25 мм, а также эвольвентный профиль с модулем от 3 мм и выше.

Возможно измерять шероховатости малых отверстий диаметром от 3 мм и пазов от 3 мм.

Принцип действия приборов моделей 201 и 202 основан на преобразовании индукционным методом колебаний ощупывающей поверхность иглы в колебания напряжения.

На рис. 113 представлена схема приборов моделей 201, 202, 240 без записывающего устройства.

Магнитная система преобразователя состоит из сдвоенного Ш-образного сердечника 4 с двумя катушками 3. Катушки и две половины первой обмотки дифференциального трансформатора 6 образуют мост, питающийся от генератора звуковой частоты 5.

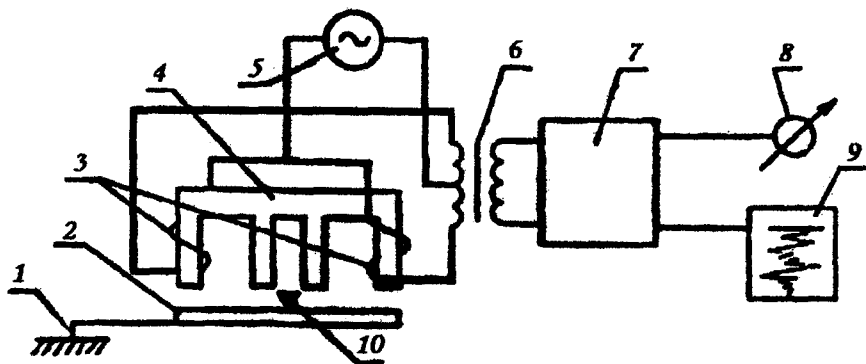


Рис. 113. Блок-схема приборов моделей 201, 202 и 240 (без записывающего устройства)

При движении алмазной иглы 1, ощупывающей неровности поверхности, начинает колебаться якорь 2 относительно опоры 10. При этом меняются воздушные зазоры между якорем и сердечником, а следовательно, и токи в плечах моста. На выходе дифференциального трансформатора 6 возникают напряжения, пропорциональные величинам неровностей, усиливаемые электронным блоком 7. На выходе блока подключают показывающий прибор 8 или записывающий 9.

Принципиальное отличие прибора 252 от 201 и 202 заключается в наличии цифрового отсчитывающего устройства (вместо шкального), на котором можно отсчитывать не только значения параметра Ra , но и ряд других величин. А именно: число шагов неровностей по средней линии n (зная длину трассы ощупывания, можно легко определить значение параметра S_m); высоту наибольшего выступа H_{\max} и глубину наибольшей впадины H_{\min} (сумма этих величин дает параметр R_{\max}), относительную опорную длину профиля t_p на стандартных уровнях сечения p .

Техническая характеристика профилографа-профилометра модели 201

Пределы измерения, мкм:

для профилографа Rz 0,02 – 20

для профилометра Ra 0,02 – 3,2

Отсечки шага при измерении

шероховатости, мм 0,08; 0,25; 0,8 и 2,5

Наименьший диаметр измеряемого отверстия или паза на глубине до 10 мм, мм	8
Максимальная длина трассы ощупывания, мм	40
Вертикальное увеличение	1000 – 200000 ^x (8 ступеней)
Горизонтальное увеличение	2 – 4000 ^x (18 ступеней)
Масса прибора, кг	80

Техническая характеристика профилографа-профилометра модели 202

Пределы измерения, мкм:	
для профилографа R_z	0,02 – 80
для профилометра R_a	0,02 – 3,2
Отсечки шага при измерении шероховатости, мм:	
прямолинейных поверхностей	0,08; 0,25; 0,8; 2,5
криволинейных поверхностей, малых отверстий и пазов	0,08; 0,25; 0,8
Наименьший диаметр измеряемого отверстия или паза на глубине до 10 мм, мм	3
Наибольшая длина трассы ощупывания, мм	35
Вертикальное увеличение	400 – 200000 ^x
Горизонтальное увеличение	2 – 4000 ^x

Техническая характеристика профилографа-профилометра модели 252

Параметры шероховатости поверхности, определяемые по показывающему устройству:

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля;

H_{\max} – высота наибольшего выступа профиля;

H_{\min} – глубина наибольшей впадины профиля;

t_p – относительная опорная длина профиля;

n – число шагов неровностей в пределах длины трассы ощупывания (по базовой линии).

Пределы измерения, мкм:	
для профилографа <i>Rz</i>	0,02 – 250
для профилометра <i>Ra</i>	0,02 – 100
H_{\max}, H_{\min}	0,1 – 100
$t_p, \%$	0 – 100
<i>n</i>	до 1000
Уровни сечения профиля при измерении $t_p, \%$	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90
Вертикальное увеличение	от 200 до 100000 (9 ступеней)
Горизонтальное увеличение	от 0,5 до 2000 (12 ступеней)
Максимальная длина трассы ощу- пывания для профилографа, мм	50
Длина трассы ощупывания для профилометра, мм	1,5; 3; 6
Значение отсечек шага, мм	0,08; 0,25; 0,8; 2,5
Вид отсчетного (показывающе- го) устройства	цифровое
Наименьший диаметр изме- ряемого отверстия или паза на глубине до 5 мм, мм	3
Масса прибора, кг	108

Также серийно выпускается профилометр модели 253. Прибор цеховой, относится к приборам А II (рис. 114).

В приборе применен механический преобразователь.

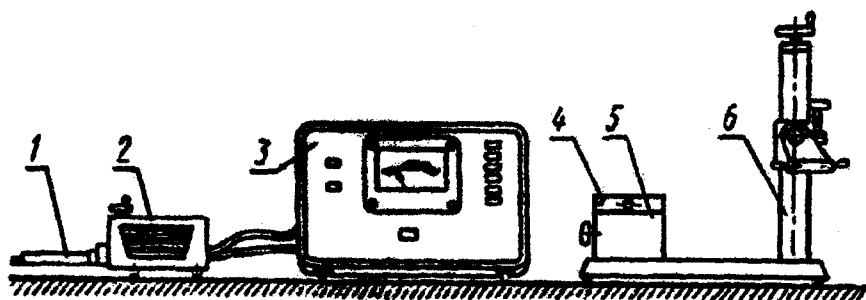


Рис. 114. Цеховой профилометр модели 253:

- 1 – механотронный преобразователь; 2 – привод; 3 – электронный блок;
4 – столик; 5 – призма; 6 – стойка

Линейные колебания иглы преобразуются в электрические сигналы преобразователем, представляющим собой механически управляемую лампу – механотрон (рис. 115), подвижный анод которого посредством тонкой мембраны 1 связан со щупом 2. На щуп укреплена алмазная игла 3 радиусом закругления 10 мкм. Механотрон вставлен в корпус 5, на передней части которого расположена твердосплавная опора 4. Механотрон вставлен в корпус посредством кольца 8 со штырем 7, упирающимся в лунку винта 6 под усилием пружины 11. Такая конструкция крепления позволяет регулировать положение механотрона для точной установки щупа относительно опоры. Положение щупа регулируется и фиксируется винтами 14, упирающимися в кольцо 10. Снизу механотрон закрыт крышкой 9. Преобразователь соединен со штоком привода вилкой разъема 13 и зафиксирован штифтом 12.

Техническая характеристика профилометра модели 253

Пределы измерения параметра Ra , мкм	0,02 – 3,2
Скорость трассировки преобразователя, мм/с	0,62
Измерительное усилие щупа, сН, не более	1
Радиус закругления ошупывающей иглы, мкм	10
Наименьший диаметр проверяемого отверстия, мм, на глубине:	
до 20 мм	6
до 130 мм	16
Габаритные размеры, мм	
преобразователя	Ø16×150
привода	135×60×78
электронного блока	323×200×223
Масса прибора (без приспособлений), кг	12

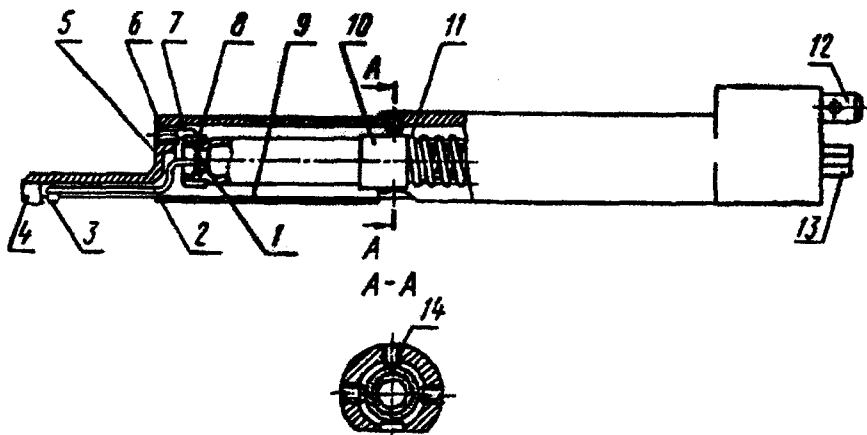


Рис. 115. Механотронный преобразователь прибора модели 253

6.2. Измерение шероховатости поверхности профильным методом приборами одновременного преобразования профиля

К настоящему времени разработаны только бесконтактные приборы одновременного преобразования профиля - контактные приборы являются перспективными.

На данный момент существует несколько типов приборов: интерферометры (приборы типа МИИ), приборы светового сечения (приборы типа ПСС), приборы теневого сечения (типа ПТС) и растровые приборы.

Все перечисленные приборы позволяют, используя тот или иной принцип одновременного преобразования профиля, наблюдать преобразованную и увеличенную картину сечения исследуемой поверхности и производить отсчет величин для определения параметров Rz , R_{max} , S_m .

6.2.1. Приборы светового сечения

Принцип действия приборов светового сечения основан на получении изображения профиля поверхности с помощью наклонно направленных к поверхности лучей. Приборы позволяют измерить средние высоты неровностей (примерно от 80 до 0,8 мкм), которые

наиболее часто встречаются на деталях машин. Поскольку в конструкции приборов светового сечения предусмотрены два микроскопа, их часто называют двойными микроскопами.

Наиболее распространены двойные микроскопы МИС-11 и ПСС-2.

Принципиальная схема метода светового сечения представлена на рис. 116, а. Освещенная узкая щель проецируется микроскопом на ступенчатую поверхность $P_1 - P_2$. Направление падения света показано стрелками. Изображение светящейся щели на ступенчатой поверхности займет положение S_2 на нижней части ступеньки P_2 и положение S_1 на верхней части ступеньки. Отразившись от поверхности, лучи падают в микроскоп наблюдения, расположенный под углом 90° к оси проецирующего микроскопа. В поле зрения микроскопа наблюдения изображение щели будет иметь вид, показанный на рис. 116, б. Смещение b изображения S_2'' относительно S_1'' определяет высоту ступеньки h .

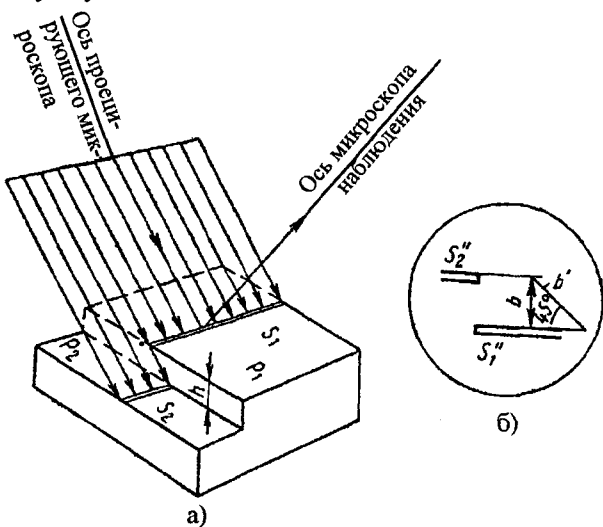


Рис. 116. Метод светового сечения

Оптическая схема двойного микроскопа приведена на рис. 117. Проецирующий микроскоп состоит из лампочки 1, защитного стекла 2, двухлинзового коллектора 3, цилиндрической щели 4, зеленого светофильтра 5, ахроматических линз 6 и 7 и сменного объектива 9.

Ширина щели 0,1 мм, длина 7 мм. Для компенсации кривизны изображения щель искривляется по цилиндрической поверхности радиусом 12,5 мм, вследствие чего эта размытость изображения щели при наблюдении в окуляр незначительна. Щель располагается перпендикулярно плоскости чертежа. Ахроматическая линза 7 является компенсационным выравнителем. Коллектор 3 с ахроматическими линзами 6 и 7 дает изображение нити лампы во входном зрачке объектива микроскопа, а щель с помощью этих линз и сменных объективов изображается на исследуемой поверхности, на которой она рассматривается микроскопом наблюдения.

Так как микроскоп наблюдения наклонен под углом 45° к нормали исследуемой поверхности, то смещение щели b будет пропорционально не h , а $h/\sin 45^\circ$, см. рис. 116, б.

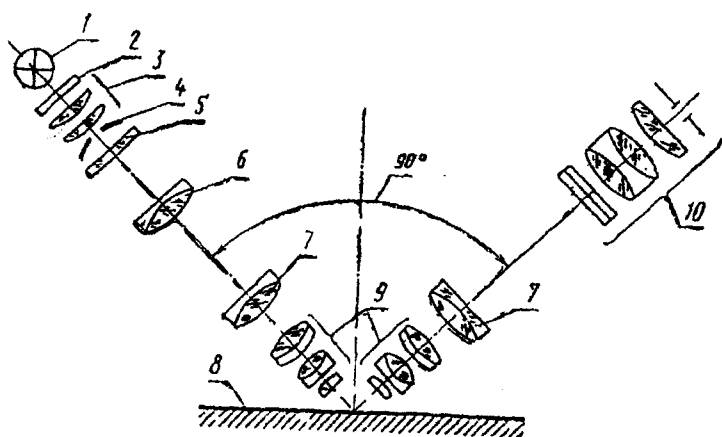


Рис. 117. Оптическая схема двойного микроскопа

В двойных микроскопах МИС-11 и ПСС-2 предусмотрены по четыре сменных объектива, с помощью которых измеряют весь диапазон значений высот неровностей.

Технические характеристики микроскопов МИС-11 и ПСС-2 различны, т. к. в ПСС-2 применены ахроматические объективы, позволяющие значительно увеличить точность отсчета.

6.2.2. Приборы теневого сечения

Принцип действия приборов теневого сечения – как и у приборов светового сечения, только здесь рассматривается тень искривления неровностями профиля поверхности, которая создается ножом, прикладываемым к исследуемой поверхности.

Приборы теневого сечения предназначены для измерения грубых поверхностей, имеющих большие высоты неровностей.

Наиболее распространены две модели этих приборов ПТС-1 и ТСП-4М. Для измерения высот неровностей $Rz(R_{\max}) = 320 - 40$ мкм, прибор ТСП-4М для $Rz(R_{\max}) = 1600 - 63$ мкм. Принципиальная схема ПТС-1 приведена на рис. 118.

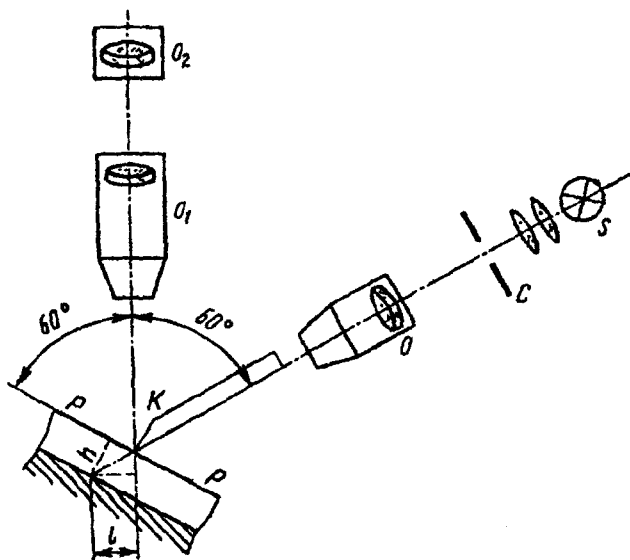


Рис. 118. Принципиальная схема прибора теневого сечения

Свет от источника S освещает щель C , которая проецируется на исследуемую поверхность PP . К вершинам неровностей этой поверхности под углом 60° к оптической оси микроскопа прикладывают режущей кромкой нож K . Тень, создаваемая ножом, искривляется неровностями профиля. Эту картину рассматривают в окуляр, см. рис. 119.

Высота изображения неровностей l равна действительной высоте неровностей h , см. рис. 119.

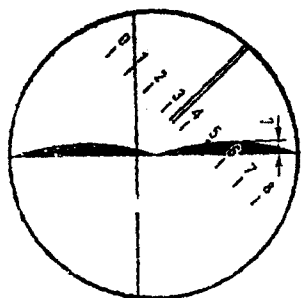


Рис. 119. Поле зрения прибора ПТС-1

от зеркала 11 и проверяемой поверхности 6 пучки лучей снова проходят микрообъективы 7 и 10 и с помощью полупрозрачной пластины 8 направляются на объектив 13, который дает в фокальной плоскости окуляра 12 изображение проверяемой поверхности и систему интерференционных полос на ней, возникающих в тех местах поверхности, где разность хода двух интерферирующих пучков лучей равна целому числу полуволн (так же, как при проверке плоскостности стеклами для интерференционных измерений). Каждая интерференционная полоса соединяет точки поверхности с одинаковой разностью хода интерферирующих лучей.

Если бы контролируемая поверхность была идеально плоской и гладкой, то на ней возникли бы прямые параллельные интерференционные полосы. Наличие на поверхности микронеровностей вызывает изменение хода лучей и искривление полос. Интерференционные полосы с большим увеличением воспроизводят микропрофиль контролируемого участка поверхности. Высоту неровностей определяют, измеряя винтовым окулярным микрометром искривление полос. Наблюдаемая в окуляр интерференционная картина может быть сфотографирована с помощью объектива 15, дающего действительное изображение в плоскости 16. Зеркало 14 при этом выводят из хода лучей.

При измерении неровностей типа ступенек с вертикально направленными боковыми поверхностями непрерывность полос может быть нарушена, вследствие чего становится невозможным най-

Микроскоп ПТС-1 накладной, переносной, общее увеличение $30\times$, апертура 0,03. У микроскопа ТСП-4М два сменных объектива $1\times$ (апертура 0,03) и $3,7\times$ (апертура 0,11) полевой диафрагмы 4 – в бесконечность. Объективы 7 и 10 проецируют вторичные изображения диафрагмы 4 на проверяемую поверхность 6 и на плоское зеркало 11. Для уравнивания длины хода в стекле обоих интерферирующих пучков лучей служит плоскопараллельная пластина 9. Отраженные

ти продолжение полосы на другом уровне. В этом случае выключают светофильтр и измерения производят в белом свете по выделяющейся на общем фоне ахроматической полосе.

Микроинтерферометр МИИ-4 (рис. 126, б) имеет массивное основание 6, на котором установлен столик 1, перемещаемый в двух взаимно перпендикулярных направлениях микрометрическими винтами 8. Проверяемую деталь 7 устанавливают на столик исследуемой поверхностью вниз, после чего винтом 4 производят фокусировку. Поворот корпуса 9 и винта 10 позволяет менять ширину и направление интерференционных полос.

Искажение интерференционных полос измеряют с помощью окулярного микрометра 3. Интерференционная картина может быть сфотографирована с помощью камеры 5 для последующего увеличения и тщательных измерений. Головка 11 управляет шторкой, закрывающей интерференционное зеркало, и позволяет рассматривать исследуемую поверхность без интерференционных полос. Низковольтная осветительная лампа мощностью 9 Вт расположена в корпусе 2, который вынесен наружу с целью уменьшения нагревания прибора.

6.2.3. Растровые микроскопы

Принцип основан на измерении искривленных муаровых полос К, см.рис. 120, получаемых в результате наложения двух растров, которые воспринимаются в виде сплошных линий. Расстояние T зависит от значения шага растров l и углов θ между направлением штрихов.

$$T = \frac{l}{2 \cdot \sin \frac{\theta}{2}}, \text{ из-за малости } \theta \text{ принимаем } T \approx \frac{l}{\theta}.$$

Если у одного из растров шаг неравномерен, то смещение (искривление) муаровых полос будет наблюдаться только в зоне, где нарушена равномерность шагов, т. е. где шаги растров больше или меньше нормального (см. рис. 120).

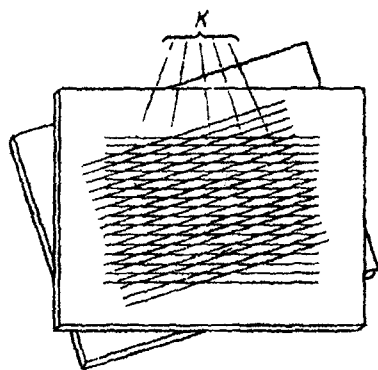


Рис. 120. Муаровые пилообразные полосы K , возникающие при наложении растров

создана изображением исследуемой поверхности вместе со спроецированными на нее штрихами исходного раstra в плоскости раstra сравнения 5.

Муаровые полосы возникают не только при наложении двух растров друг на друга, но и в случае проекции одного из растров (исходного) в плоскость штрихов другого раstra (сравнения). Это явление используют при измерении шероховатости поверхности.

Для этого штрихи исходного раstra 1 (рис. 121) с помощью осветителей проецируют через оптическую систему 2

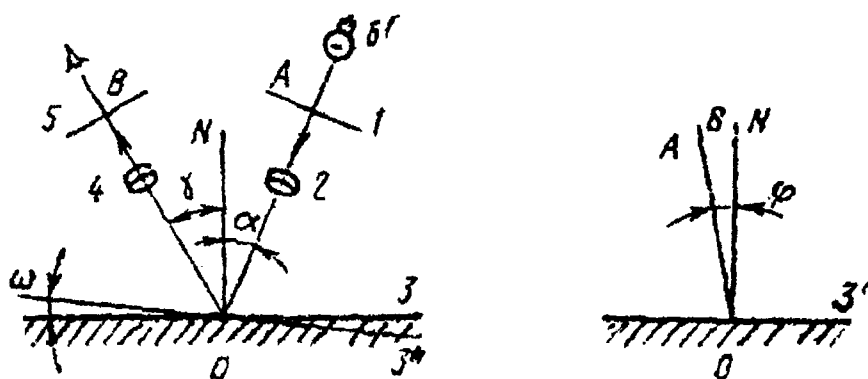


Рис. 121. Схема, положенная в основу растровых приборов для измерения неровностей: а - вид спереди; б - вид сбоку

В местах, где штрихи раstra проецируют на склоны неровностей исследуемой поверхности, обращенные к проецируемому шупу, расстояние между соседними штрихами l_1' меньше, чем нормаль-

ный шаг l'_0 , а на противоположных склонах эти расстояния (l'_2) будут больше l'_0 (см. рис. 122). Измерение расстояний пропорционально высотам неровностей.

Цена муаровой полосы C , т. е. неплоскостность, соответствующая искривлению в одну муаровую полосу, зависит от шага l'_0 исходного растра в плоскости исследуемой поверхности, угла проекции α , угла наблюдения γ , угла наклона ω плоскости изображения $3'$ относительно исследуемой поверхности, угла φ между нормалью NO к плоскости $3'$ и плоскостью AOB , проходящей через оптические оси проецирующей и наблюдательной систем (см. рис. 121).

$$C = l'_0 \cdot \frac{1 + \operatorname{tg}\omega \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot \cos\varphi}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\gamma}$$

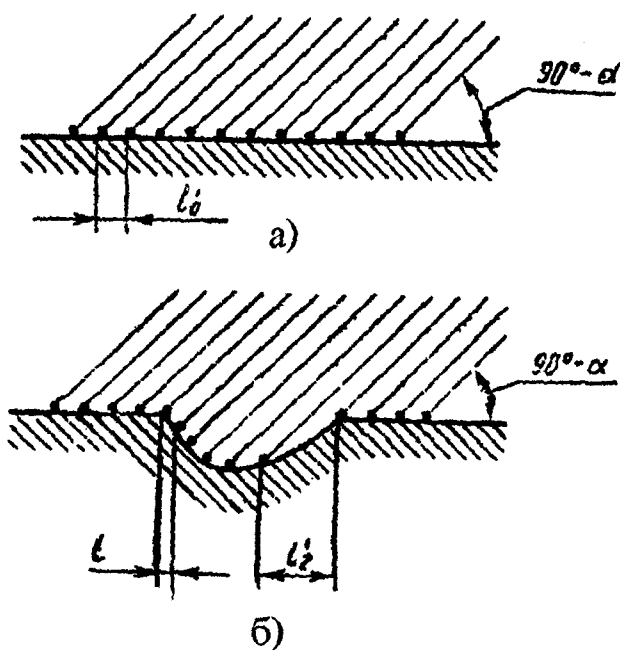


Рис. 122. Проецирование растров: а – на гладкую поверхность; б – на поверхность, имеющую неровности

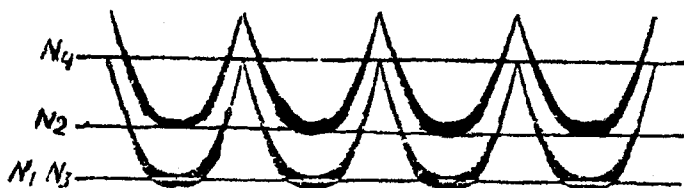


Рис. 123. Определение высоты неровностей на растровых микроскопах

Зная цену муаровой полосы и измерив ее искривление в долях полосы, можно определить высоту неровности

$$H = C \cdot \frac{N_3 - N_4}{N_1 - N_2},$$

где $N_1 - N_2$ — разность отсчетов по измерительному устройству, а $N_3 - N_4$ — разность отсчетов по измерительному устройству, соответствующая искривлению полос.

Оптическая система растрового микроскопа ОРМ-1 показана на рис. 124.

Нить лампы накаливания 4 расположена в фокусе коллектора 2. Выходящий из коллектора 2 параллельный пучок лучей, отражаясь от зеркала 1, направляется на исходный растр 6. Штрихи растра 6 располагаются перпендикулярно плоскости рисунка и находятся в фокальной плоскости объектива 10, куда помещена исследуемая поверхность 11.

Наблюдательный микроскоп состоит из левой части объектива 10 и дополнительной линзы 12 и создает изображение исследуемой поверхности и проецированного на нее растра 6 в плоскости сравнения.

Картина муаровых полос, возникающая в плоскости растра сравнения 13, проходит через коллективную линзу 18, а затем может идти двумя путями:

1) в плоскость фотопленки 15 при отведенном в правое положение зеркале 14;

2) к зеркалу 14, находящемуся в левом положении, через объектив 16 к зеркалам 17 и 22 (также находящимся в левом положении)

на плоскость сетки 23 окулярного микрометра 24. При отведенном вправо зеркале 22 картина передается на экран 21 через зеркала 20 и окуляр 19 с зеркалом 17.

Для повышения контрастности муаровых полос в систему введены светофильтр 5 и апертурная диафрагма 3.

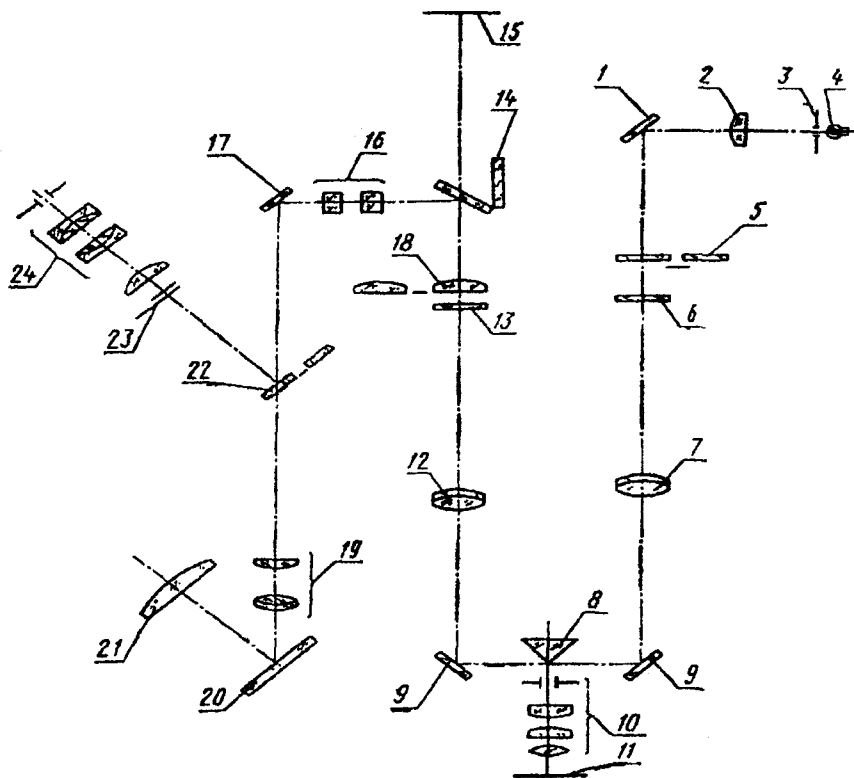


Рис. 124. Оптическая схема растрового микроскопа ОРИМ-1

С помощью микроскопа ОРИМ-1 высоту неровностей можно измерить тремя способами: с помощью окулярного микрометра, по отпечаткам фотопленки и приближенно на экране. Все три способа сводятся к относительному измерению искажения муаровой полосы в долях расстояния между двумя соседними муаровыми полосами.

6.2.4. Интерферометры

Принцип действия интерферометров основан на интерференции света. Интерферометры позволяют измерить только небольшие высоты неровностей (не превышающих $\approx 1\text{мкм}$), так как при больших значениях интерференционная картина пропадает. Действие интерферометров основано на следующей принципиальной схеме (рис. 125).

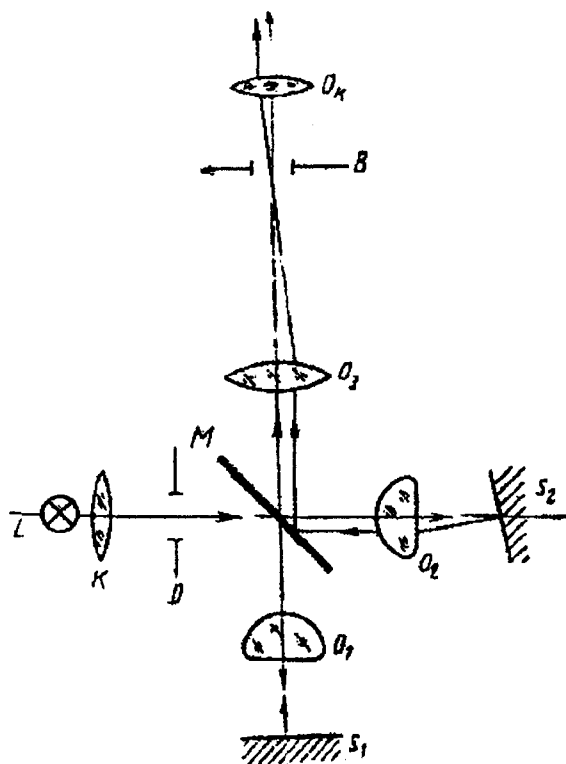


Рис. 125. Принципиальная оптическая схема интерферометров

Свет от источника L через конденсор K и диафрагму D делится на полупрозрачной пластине M на два когерентных пучка. Один из пучков падает через микробъектив O_1 на исследуемую поверхность S_1 , отразившись от которой снова попадает в объектив O_1 и

фокусируется в плоскости B , являющейся фокальной плоскостью окуляра O_k .

Второй пучок проходит разделительную пластину M и микрообъектив O_2 , падает на зеркало сравнения S_2 , наклоненное относительно оптической оси на небольшой угол (для объектива с увеличением $40\times$ угол не более 3°). Объектив O_2 проецирует изображение зеркала сравнения S_2 также в плоскости B . В результате сложения этих когерентных пучков света в плоскости B возникают интерференционные полосы, искривленные соответственно профилю исследуемой поверхности.

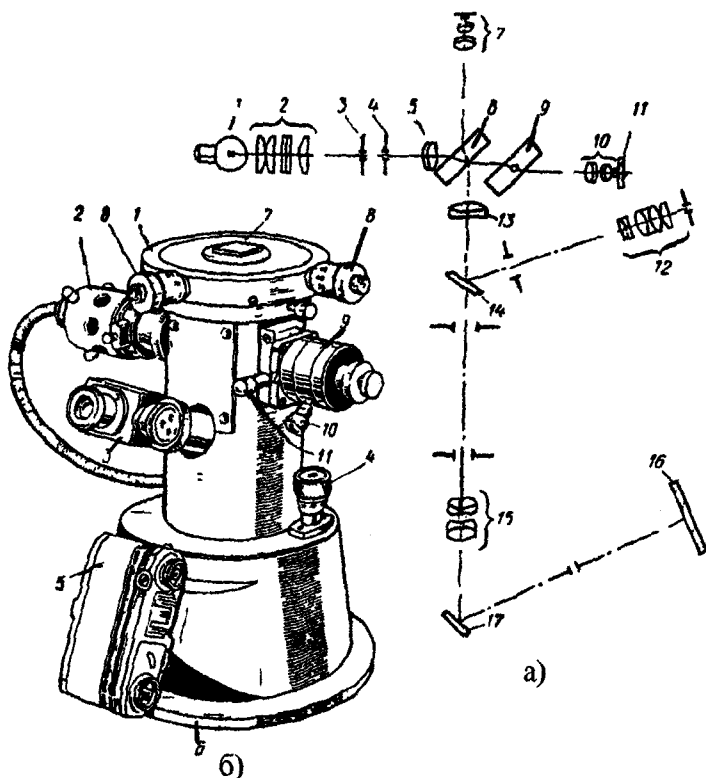


Рис. 126. Микроинтерферометр МИИ-4

Интерферометры предназначены для измерения неровностей, высота которых не превышает 1 мкм. Верхний предел измерения определяется в основном глубиной изображения интерферометра, зависящей от апертуры объектива и увеличения прибора. Общее увеличение прибора должно быть не менее $500\times$ и $700\times$, апертура объектива не менее 0,5 и 0,65 и линейное поле зрения не менее 0,32 и 0,2 мм.

Интерферометр МИИ-4 представляет собой сочетание интерферометра Майкельсона с микроскопом (см. рис. 126).

Нить лампы 1 проецируется конденсором 2, между линз которого установлен светофильтр, в плоскость апертурой диафрагмы 3. Объектив 5 через полупрозрачную плоскопараллельную пластину 8 проецирует изображение диафрагмы 3 в плоскость зрачков входа двух одинаковых микрообъективов 7 и 10.

7. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

7.1. Измерение наружного диаметра

При измерении наружного диаметра применяют следующие методы и средства измерения:

а) метод непосредственной оценки (вертикальный и горизонтальный длиномер; измерительную машину; рычажный микрометр с ценой деления 0,002; 0,005 и 0,01 мм; универсальный микроскоп);

б) метод сравнения с мерой (вертикальный и горизонтальный оптиметр; настольный микрометр со стрелочным устройством с ценой деления 0,001 мм).

7.2. Измерение внутреннего диаметра

Внутренний диаметр резьбовых калибров-пробок измеряют на инструментальном или универсальном микроскопе проекционным методом или на проекторе типа БП. Риску окулярной сетки микроскопа наводят на точки, в которых прямолинейные участки профиля переходят в криволинейные (рис. 127, а), или на точки, ограничивающие углубление внутреннего диаметра (рис. 127, б).

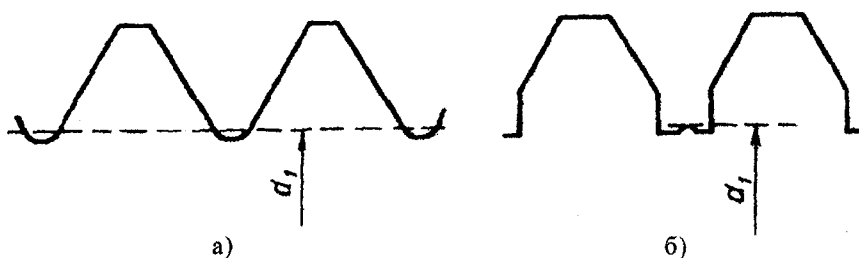


Рис. 127

Непосредственное измерение внутреннего диаметра может быть заменено измерением высоты профиля, которую сравнивают со значением $t_{2Д}$, вычисленным по формуле

$$t_{2Д} = \frac{d_{Д} - d_{1наиб}}{2},$$

где $d_{Д}$ – действительный размер наружного диаметра, мм;

$d_{1наиб}$ – наибольший предельный размер внутреннего диаметра калибра-пробки, мм. Высота профиля не должна превышать расчетного значения.

7.3. Измерение среднего диаметра

Средний диаметр калибра-пробки с полным числом витков измеряют в трех диаметральных сечениях, перпендикулярных к оси на концах и в середине резьбы, и только у калибров с неполным числом витков менее пяти в одном сечении. В каждом сечении средний диаметр измеряют не менее чем в двух диаметральных направлениях, расположенных под углом 90° .

Для измерения применяют следующие средства измерений: вертикальный и горизонтальный контактные интерферометры, вертикальный и горизонтальный оптиметры, измерительную машину, пружинную и пружинно-оптическую головки с ценой деления $0,001$ мм, вертикальный длиномер, настольный микрометр со стрелочным устройством, рычажные микрометры с ценой деления

0,002; 0,005 и 0,01 мм, рычажные скобы с ценой деления 0,002 и 0,005 мм, концевые меры длины 4-го и 5-го разрядов, проволоочки и ролики классов точности 0 и 1, универсальный микроскоп, измерительные ножи, приспособление с шаровыми наконечниками, призматические приспособления.

Измерения выполняют следующими методами.

С помощью трех проволоочек. Во впадины резьбы закладывают три проволоочки одного размера (рис. 128, а), измеряют размер M_3 .

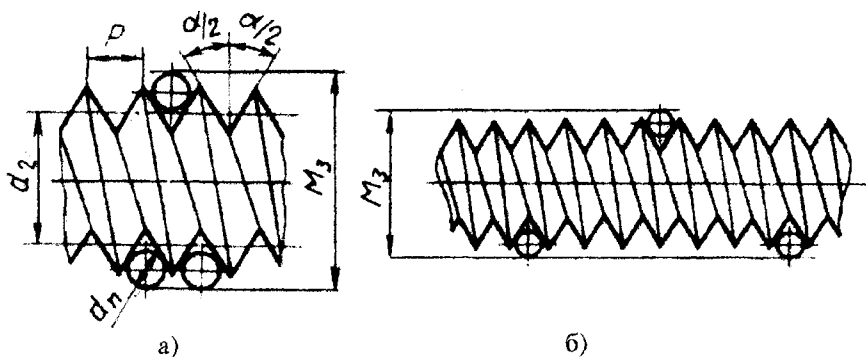


Рис. 128

При шаге резьбы 0,5 мм и менее проволоочки, работающие в паре, могут быть заложены не в соседние впадины, но обязательно симметрично по отношению к оси одиночной проволоочки (рис. 128, б). При определении размера M_3 на оптиметрах и концевой измерительной машине типа ИЗМ-10 применяют плоские наконечники с узкой измерительной поверхностью. Отклонение от плоскостности измерительных поверхностей наконечников не должно превышать 0,0002 мм. При использовании для измерения горизонтального оптиметра пробки диаметром до 10 мм вставляют в ручку, которую укрепляют в горизонтальном положении на универсальном столе оптиметра. Проволочки подвешивают на кронштейне, укрепленном на пинольной трубке. Пробки диаметром более 10 мм закрепляют в вертикальных центрах, имеющих в комплекте к оптиметру. Пробки диаметром более 60 мм устанавливают и закрепляют на универсальном столе оптиметра так, чтобы ось резьбы располагалась вер-

тикально, тогда проволоочки при закладке во впадине резьбы расположатся горизонтально. При измерении на вертикальном оптиметре также применяют плоский наконечник. Отклонение от параллельности рабочей поверхности стола оптиметра к измерительной поверхности наконечника не должно превышать 0,0005 мм на длине, равной диаметру наконечника. Калибр на двух проволоочках укладывают на столе прибора. Третью проволоочку закладывают сверху во впадину резьбы калибра. Плоскость наконечника прибора должна касаться верхней проволоочки.

$$d_2 = M_3 - d_{\Pi} \cdot \left(1 + \frac{1}{\sin(\alpha/2)} \right) + \frac{P \operatorname{ctg}(\alpha/2)}{2} + C,$$

где d_{Π} – наивыгоднейший диаметр проволоочки, мм, определяемый по формуле

$$d_{\Pi} = \frac{P}{2 \cdot \cos(\alpha/2)};$$

P – номинальное значение шага резьбы, мм;

α – номинальное значение угла профиля резьбы, угл. градус;

C – суммарная поправка, мкм:

$$C = C_1 + C_3 + C_4 + C_5,$$

отдельные составляющие которой для метрической резьбы определяют из следующих соотношений:

$$C_1 = (0,5 \cdot d_{\Pi} - 0,3 \cdot P) \cdot \Delta\alpha -$$

поправка, учитывающая действительное отклонение профиля от номинального значения. Вводится только при пользовании проволочками нерационального диаметра;

$$C_3 = -1,5 \cdot \left(\Delta d'_\Pi + \frac{\Delta d''_\Pi + \Delta d'''_\Pi}{2} \right) -$$

поправка, учитывающая действительные отклонения диаметров проволок $\Delta d'_\Pi$ $\Delta d''_\Pi$ $\Delta d'''_\Pi$, мкм. Вводится только при применении проволок класса, не предусмотренного ГОСТ 8.128-74;

$$C_4 = - \frac{0,07599 P^2 n^2 d_\Pi}{(d_2 - 0,8660P + 2d_\Pi) \cdot (d_2 - 0,8660P + 1,5d_\Pi)} -$$

поправка, учитывающая расположение проволок под углом к оси резьбы, отличающимся от 90° , на угол подъема резьбовой канавки (для углов подъема резьбы до 7°); n – число заходов резьбы;

C_5 – поправка, учитывающая сплющивание проволок, наконечников и калибра под действием измерительного усилия. Определяется в сумме с C_4 . В ГОСТ 8.128-74 приведены таблицы значений ($C_4 + C_5$) при измерительном усилии 50 и 200 сН, а также метод расчета этих величин.

Для упорной резьбы средний диаметр подсчитывают по формуле

$$d_2 = M_3 - D_\Pi \left(1 + \frac{\cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}}{\sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} \right) + P \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} + C,$$

где α_1 и α_2 – номинальные значения углов наклона сторон профиля резьбы (рис. 128).

С помощью двух проволок. Средний диаметр подсчитывается по формуле

$$d_2 = M_2 - \frac{P^2}{8 \cdot (M_2 - d_\Pi)} - d_\Pi \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) + \frac{P \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} + C.$$

Для упорной резьбы

$$d_2 = M_2 - \frac{P^2}{8 \cdot (M_2 - d_{\Pi})} - d_{\Pi} \left(1 + \frac{\cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}}{\sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} \right) + P \cdot \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} + C.$$

С помощью одной проволочки. Необходимость в этом методе возникает при измерении среднего диаметра калибров размеров свыше 100 мм. Калибр помещают на плиту и средний диаметр определяют с помощью одной проволочки и вертикальных оптиметра и длиномера или оптикатора. Измерительный наконечник должен быть плоским. Чтобы исключить влияние на результат измерения эксцентricности калибра по наружному и среднему диаметрам, размер M_1 определяют дважды, поворачивая калибр на 180° , и вычисляют среднее арифметическое M_{cp} .

$$d_2 = 2 \cdot M_{1cp} - d - d_{\Pi} \left(1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) + P \frac{\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} + C,$$

где d – действительный размер наружного диаметра, измеренный с точностью не ниже точности двух измерений M_1 .

Для упорной резьбы

$$d_2 = 2 \cdot M_{1cp} - d - d_{\Pi} \left(1 + \frac{\cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}}{\sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} \right) + P \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} + C.$$

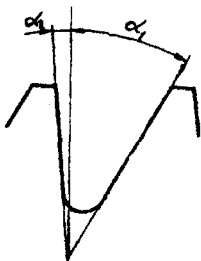


Рис. 129

С помощью приспособления с шаровыми наконечниками. При измерении среднего диаметра калибров для трапецеидальной и упорной резьб на универсальном микроскопе применяют специальные приспособления с шаровыми наконечниками (рис. 129). Диаметры $d_{ш}$ наконечников должны быть возможно ближе к наивыгоднейшему диаметру проволок для данного шага резьбы. Диафрагму микроскопа устанавливают так, чтобы диаметр шарового наконечника, измеренный на микроскопе проекционным методом, отличался не более чем на 0,001 мм от размера, полученного ранее при измерении контактным методом. С целью исключения влияния неперпендикулярности оси резьбы к направлению измерения размер N определяют дважды, с перестановкой одного из приспособлений, в формулу вводят N_{cp} — среднее арифметическое измеренных значений N_1 и N_2 .

Для трапецеидальной резьбы

$$d_2 = N_{cp} - d_{ш} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right) + P \cdot \frac{\operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{2} + C.$$

Для упорной резьбы

$$d_2 = N_{cp} - d_{ш} \left(\frac{\cos \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}}{\sin \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}} \right) + P \cdot \frac{\cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)} + C.$$

Суммарную поправку C определяют, как описано выше, кроме поправки C_3 , которую вычисляют по формулам:

для трапецеидальной резьбы

$$C_3 = -1,4 \cdot (\Delta d'_{ш} + \Delta d''_{ш});$$

для упорной резьбы

$$C_3 = -1,2 \cdot (\Delta d'_{ш} + \Delta d''_{ш}),$$

где $\Delta d'_{ш}$ и $\Delta d''_{ш}$ – действительные отклонения диаметров шариков от номинального значения.

С помощью измерительных ножей. Средний диаметр калибров для метрических, дюймовых, трубных и трапецидальных резьб измеряют на универсальном микроскопе с помощью измерительных ножей (рис. 130).

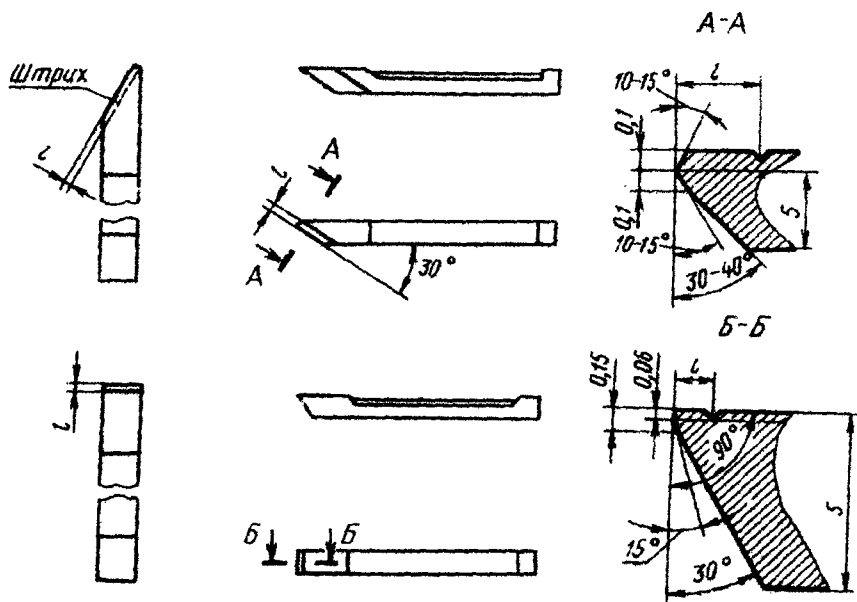


Рис. 130

В зависимости от назначения измерительные ножи бывают прямые – для измерений гладких, цилиндрических и конических деталей (рис. 130) и резьбовые – для измерения элементов резьбы, причем эти последние бывают правые и левые. Рабочий размер ножа l – расстояние от рабочей грани до середины штриха в направлении,

перпендикулярном к рабочей грани. В зависимости от l изготавливают большие ножи ($l = 0,9 \pm 0,0005$ мм) и малые ($l = 0,3 \pm 0,0005$ мм).

Размеры $l = 0,3$ и $0,9$ мм соответствуют расстояниям от среднего креста (см. рис. 131) до соответствующих штриховых рисок окулярной угломерной головки микроскопа. Это облегчает условия визирирования и повышает его точность. Визируют соответствующую штриховую риску 2 на риску ножа 1, а крест 3 автоматически устанавливается на профиль резьбы.

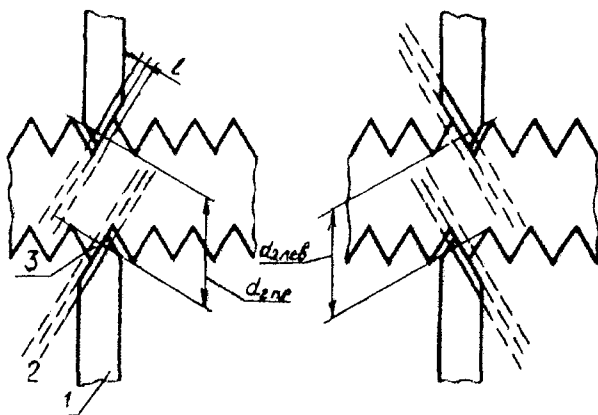


Рис. 131

У калибра, установленного в центрах микроскопа, измеряют средний диаметр проекционным методом обязательно по правым и по левым сторонам профиля (см. рис. 131). Действительный размер среднего диаметра

$$d_2 = \frac{d_{2np} + d_{2лев}}{2} + E + C_2,$$

где E – поправка, учитывающая действительные отклонения расстояния от лезвия измерительного ножа до оси штриха:

$$E = -\frac{1}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} (\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3 + \Delta l_4),$$

здесь $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3, \Delta l_4$ – действительные отклонения расстояния от лезвия до штриха для всех ножей, применяемых при измерении;

C_2 – поправка, учитывающая действительное отклонение шага от номинального размера. Поправку C_2 вычисляют по формулам: для метрической резьбы

$$C_2 = -0,9 \cdot \Delta P;$$

для дюймовой и трубной резьб

$$C_2 = -1 \cdot \Delta P;$$

для трапецидальной резьбы

$$C_2 = -1,9 \cdot \Delta P.$$

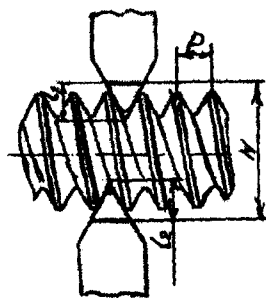


Рис. 132

Измерения по обеим сторонам профиля выполняют для того, чтобы вычислением среднего арифметического автоматически исключить систематическую погрешность, вызываемую перекосом оси резьбы относительно линии измерения (направления перемещения каретки микроскопа). Подобный метод применяют также при измерении шага резьбы и половин угла профиля.

Схема, показывающая происхождение погрешностей при двух измерениях (равных по абсолютной величине, но с разными знаками), дана на рис. 132.

С помощью призматических ножей. При измерении среднего диаметра калибров для часовой резьбы с шагом менее 0,2 мм на универсальном микроскопе применяют специальные призматические ножи (рис. 133).

$$d_2 = N - \left(l_1 + l_2 - \frac{P}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \right),$$

где l_1 и l_2 – рабочие размеры первого и второго ножей, которые должны быть предварительно аттестованы. Боковые измерительные поверхности ножей повернуты относительно основания ножей на угол подъема резьбы.

Ножи применяют в специальном приспособлении. Для исключения погрешностей, связанных с углом профиля резьбы, результаты измерений целесообразно уменьшать: на 0,001 мм для резьбы с шагом до 0,125 мм и на 0,002 мм при шаге более 0,125 мм. стакан – по ГОСТ 10394-72, вместимостью 150 см³.

С помощью резьбовых вставок. На результаты измерения (рис. 133, а) влияют погрешности угла наклона образующих профиля резьбы и вставок 1 и 2, поэтому этим методом нельзя независимо измерить средний диаметр резьбы. Резьбовые вставки применяют в сочетании с резьбовым микрометром или индикаторной скобой для измерения среднего диаметра цилиндрической резьбы либо для метчиков с нечетным числом канавок (рис. 133, б).

Индикаторная скоба для метчиков обладает недостатками, присущими трехконтактным приборам. Для снижения их отрицательных влияний рычаг, связывающий подвижный измерительный наконечник 1 с индикатором 3, делают с различной длиной плеч.

Измерение среднего диаметра внутренней резьбы. На рис. 134 дана схема применяемого для этих целей индикаторного прибора. Закрепленный в корпус прибора индикатор 1 связан с конусом 2. Положение конуса, а следовательно, и показание индикатора зависят от положения измерительных наконечников 3, которые перемещаются в резьбовой пробке 4, в зависимости от размера среднего диаметра проверяемой резьбы. Между резьбовой пробкой, связанной жестко с корпусом прибора и проверяемой резьбой, должен быть зазор.

Параметры резьбовых колец могут быть измерены также на оптиметре ИКГ-3 и длиномере ИКУ-2 с помощью приспособления ИП-9.

Средний диапазон резьбового кольца может быть также измерен с помощью микрометрического нутромера с резьбовыми вставками.

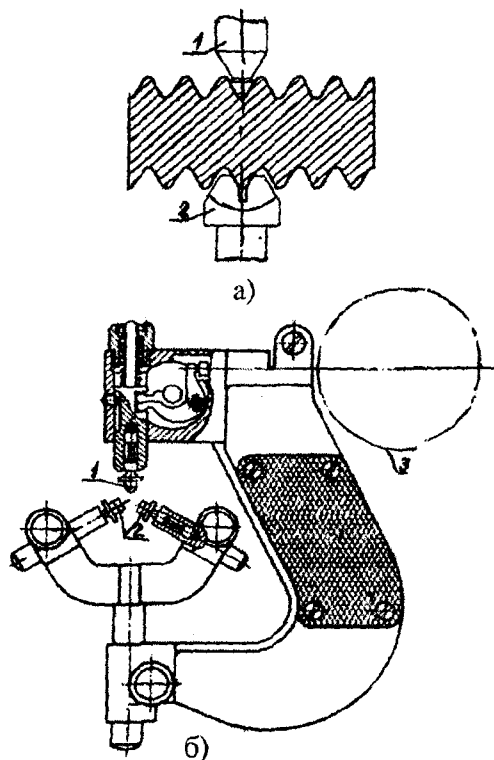


Рис. 133

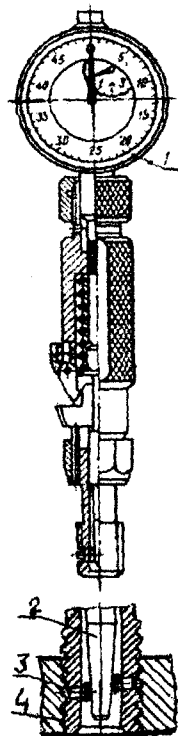


Рис. 134

8. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ

Методы и средства измерений параметров, входящих в нормы бокового зазора

Все зубчатые соединения работают в однопрофильном зацеплении, и всегда должен быть обеспечен наименьший гарантированный боковой зазор $j_{\text{лmin}}$ (рис. 135). Он необходим для компенсации возможного изменения размеров зубчатых колес вследствие нагрева передачи в процессе эксплуатации, для обеспечения нормальных условий смазывания зубьев, а также для предотвращения удара по нерабочим профилям, который может быть вызван разрывом контакта рабочих профилей из-за динамических явлений.

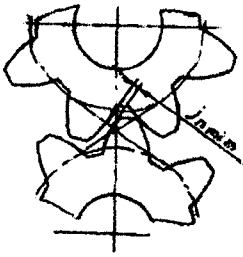


Рис. 135

Боковой зазор зубчатого зацепления с большим модулем можно определить непосредственно с помощью щупов или свинцовой пластинки. Пластинку закладывают в зацепление, затем проворачивают колеса и по толщине сжатой пластинки определяют зазор.

Кроме того, применяют косвенные методы измерения:

1. Измерение предельных отклонений измерительного межосевого расстояния – $A_{a1}'' + A_{ae}''$.

2. Измерение наименьшего отклонения средней длины общей нормали – $A_{W_{mc}}$.

3. Измерение наименьшего дополнительного смещения A_{Hr} исходного контура A_H (рис. 136, а). Действительное положение исходного контура 2 определяют с помощью зубомеров относительно окружности выступов. У зубомеров смещения типа НЦ с базой по окружности выступов (рис. 136, а) измерительные поверхности двух губок составляют двойной угол зацепления, а ось измерительного стержня индикатора делит этот угол пополам. Прибор настраивают по образцовым роликам. Показания индикатора при измерении зубчатого колеса соответствуют смещению исходного контура от его номинального положения 1 по отношению к наружному диаметру. Неточности наружного диаметра сказываются прямо, непосредственно. Прибор нечувствителен к покачиванию.

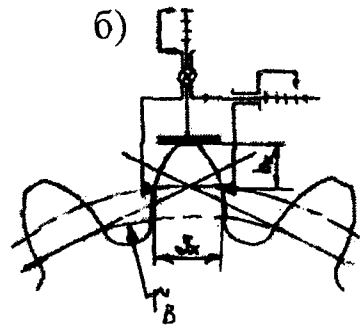
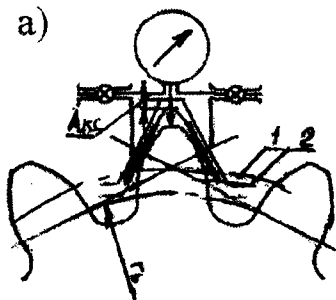


Рис. 136

Действительное положение исходного контура для мелко модульных зубчатых колес можно определять проекционным методом.

4. Измерение толщины зуба по хорде S_x . Измерение выполняют на определенной высоте h_x с помощью штангензубомера (рис. 136, б) с кромочными наконечниками. Высоту h_x берут такой, чтобы измерения делать по постоянной хорде. Аналогично измеряют и оптическим зубомером.

На рис. 137 изображен хордовый зубомер БВ-5038 для колес с модулем 16-32 мм. Перемещение левой губки отсчитывают по измерительной головке с ценой деления 0,01 мм. Правую губку перемещают по корпусу с помощью микрометрической головки и устанавливают на размер S_x , который фиксируется стопором. Высотный наконечник перемещают с помощью микрометрической головки и устанавливают на размер h_x , который фиксируется стопором.

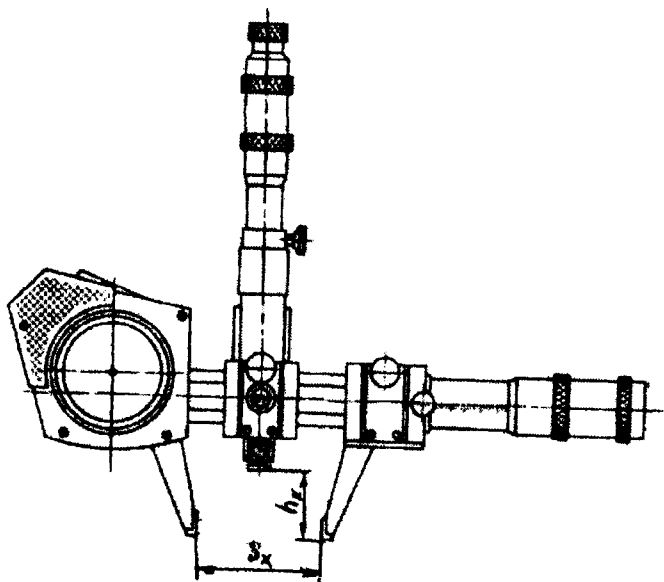


Рис. 137

К прибору прилагаются таблицы соотношений значений S_x и h_x в зависимости от модуля и угла зацепления.

Для колес внутреннего зацепления с модулями 8-16 мм приме-

няют кромочный индикаторный зубомер БВ-5017 К (рис. 138). Выпускаются также зубомеры БВ-5016К аналогичной конструкции для модулей 1-10 мм – они имеют лишь меньшие габаритные размеры. Толщину зуба по хорде измеряют также зубомером ЗИМ-16, зубомерным микрометром МЗ, штангензубомером с нониусом. Народное предприятие «Цейс» выпускает оптические зубомеры, имеющие отсчетные устройства с ценой деления 0,02 мм, как и у штангензубомера, но более высокой точности, благодаря введению в конструкцию лупы.

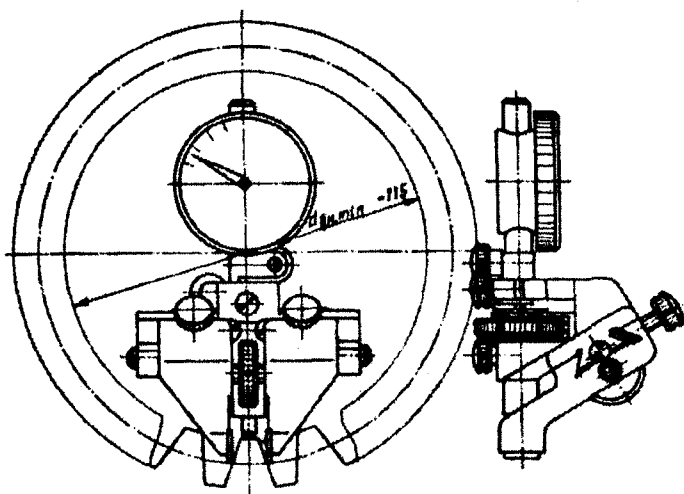


Рис. 138

5. Измерение расстояния M между роликами, закладываемыми в противоположные впадины зубчатого колеса, что является косвенным методом определения смещения исходного контура. Метод обладает высокой точностью, однако наибольший и наименьший зазоры этим методом определены быть не могут, так как измерение ведут независимо от оси колеса, вследствие чего из результатов измерений исключается биение зубчатого венца. Значение M для четного или нечетного числа зубьев определяют по формулам, приведенным в ГОСТ 16532-70.

Л и т е р а т у р а

1. Авдулов А.Н. Контроль и оценка круглости деталей машин. – М.: Изд-во стандартов, 1974.
2. Аникст Д.А. Высокоточные угловые измерения. – М.: Машиностроение, 1987.
3. Бурдун Г. Д. Линейные и угловые измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1972.
4. Городецкий Ю.Т. Конструкции, расчет и эксплуатация измерительных инструментов и приборов. – М.: Машиностроение, 1971.
5. Иванов А.Г. Измерительные приборы в машиностроении: Учеб. пособие для студентов приборостроительных спец. вузов. – М.: Изд-во стандартов, 1981.
6. Иванов Б.Н. Измерение линейных размеров методом обкатывания роликом. – М.: Машиностроение, 1973.
7. Иванов О.А. Специальные приборы для линейно-угловых измерений. – М.: Изд-во стандартов, 1983.
8. Лоповок Т.С. Волнистость поверхности и ее измерение. – М.: Изд-во стандартов, 1973.
9. Матвеев В.И. Отсчетные устройства приборов и систем. – М.: Машиностроение, 1983.
10. Медянцева Л.Л., Горбачева В.В., Шарова Е.Е. Контроль прямолинейности и плоскостности. – М.: Изд-во стандартов, 1972.
11. Палей М.А. Отклонения формы и расположения поверхностей. – 2-е изд. - М.: Изд-во стандартов, 1973.
12. Сорочкин Б.М., Тененбаум Ю.З., Курочкин А.П., Виноградов Ю.Д. Средства для линейных измерений. – Л.: Машиностроение, 1978.
13. Тайц Б.А., Марков Н.Н. Точность и контроль зубчатых передач. – Л.: Машиностроение, 1978.

С о д е р ж а н и е

В в е д е н и е	3
1. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА.	4
1.1. Отсчетные устройства на лампах накаливания и световодах.	4
1.2. Катодолюминесцентные отсчетные устройства.	9
1.3. Электролюминесцентные отсчетные устройства и экраны.	14
1.4. Отсчетные устройства и матрицы на светоизлучающих диодах.	27
1.5. Газоразрядные отсчетные устройства и панели.	40
1.6. Отсчетные устройства на жидких кристаллах.	60
1.7. Перспективы развития оптоэлектронных отсчетных устройств.	67
2. РАБОЧИЕ МЕРЫ И ОТСЧЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОТОЧНЫХ УГЛОМЕРНЫХ ПРИБОРОВ.	70
2.1. Рабочие меры.	70
2.2. Штриховые рабочие меры.	72
2.3. Кодовые рабочие меры.	77
2.4. Растровые рабочие меры.	87
2.5. Электромеханические преобразователи.	91
3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ УГЛОВ И КОНУСОВ. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ.	95
3.1. Методы и средства измерений углов, основанные на их сравнении с жесткой образцовой мерой.	95
3.1.1. Определение угла по размеру световой щели.	96
3.1.2. Измерение углов с помощью рычажно-механических и рычажно-оптических приборов.	100
3.1.3. Пневматический метод контроля конусов.	107
3.1.4. Контроль конусов методом припасовки по краске.	108
3.2. Методы и средства измерения координат, образующих угол, и расчет угла с использованием тригонометрических функций.	109
3.2.1. Координатный метод измерений наружного конуса на универсальном микроскопе.	109
3.2.2. Координатный метод измерений наружного конуса на рычажном приборе.	110
	235

3.2.3. Измерение углов синусной линейкой.	110
3.2.4. Измерение углов тангенсной линейкой.	115
3.2.5. Измерение конусов с помощью шариков, роликов и концевых мер длины.	116
3.3. Методы и средства измерения углов, основанные на их сравнении с угловой шкалой прибора.	117
3.3.1. Характеристика метода и его основные погрешности. . .	117
3.3.2. Измерения углов с помощью автоколлимационных труб.	119
3.3.3. Воспроизведение единицы плоского угла методом калибровки.	124
3.3.4. Установка для измерений углов с помощью автоколлимационной трубки оптиметра.	126
3.3.5. Измерение углов с помощью оптических делительных головок.	127
3.3.6. Измерение углов на универсальном и инструментальном микроскопах.	130
3.3.7. Уровни.	131
3.3.8. Угломеры.	149
4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.	152
4.1. Кругломеры.	155
4.2. Кругломеры зарубежных фирм.	160
4.3. Преобразование и регистрация сигнала измерительной головки.	166
5. ИЗМЕРЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ФОРМЫ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.	182
5.1. Измерение плоскостности сферометрами и карусельными плоскомерами.	186
5.2. Гидростатические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности.	188
5.2.1. Метод измерения с помощью свободно налитой жидкости.	188
5.2.2. Метод измерения с помощью сообщающихся сосудов. .	188
5.2.3. Метод измерения с помощью уровней.	189
5.3. Оптико-механические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности.	190
5.3.1. Автоколлимационный и коллимационный методы.	190

5.3.2. Метод визирования с помощью зрительных труб.	191
5.4. Оптические линейки.	194
5.5. Оптические принципы измерения непрямолинейности и неплоскостности.	197
6. ИЗМЕРЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРОФИЛЬНЫМ МЕТОДОМ ПРИБОРАМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЯ.	200
6.1. Профилографы и профилометры, выпускаемые серийно.	201
6.2. Измерение шероховатости профильным методом приборами одновременного преобразования профиля.	207
6.2.1. Приборы светового сечения.	207
6.2.2. Приборы теневого сечения.	210
6.2.3. Растровые микроскопы.	212
6.2.4. Интерферометры.	217
7. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ДЕТАЛЕЙ.	219
7.1. Измерение наружного диаметра.	219
7.2. Измерение внутреннего диаметра.	219
7.3. Измерение среднего диаметра.	220
8. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗУБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ.	230
Методы и средства измерений параметров, входящих в нормы бокового зазора.	230
Л и т е р а т у р а	234

Учебное издание

КОВАЛЕВ Лев Дмитриевич
СУРОВОЙ Сергей Николаевич

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ
И УГЛОВЫХ ВЕЛИЧИН

Учебное пособие

Редактор Т.Н.Микулик. Корректор М.П.Антонова
Компьютерный набор и верстка Л.М.Чернышевич

Подписано в печать 31.01.2003.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 13,8. Уч.-изд. л. 10,8. Тираж 300. Заказ 38.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия ЛВ №155 от 30.01.2003. 220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.