

Министерство образования и науки Российской Федерации

Вологодский государственный университет

Б.А. Шкарин

**МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И ПРИБОРЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Утверждено редакционно-издательским советом
в качестве учебного пособия*

Вологда
2014

УДК: 001.891.5.002.56(075.8)
ББК 22.17286я73
Ш 66

Рецензенты:

Н.С. Григорьев, канд. техн. наук, доцент, директор МРЦПК
Вологодского государственного университета;

Н.В. Дорогов, канд. техн. наук, доцент, зам. генерального директора
по производству Вологодского подшипникового завода

Шкарин, Б.А.

Ш 66 Методы, средства и приборы экспериментальных исследований:
учебное пособие / Б.А. Шкарин. – Вологда: ВоГУ, 2014. – 78 с.

В учебном пособии рассмотрена методология, основные принципы, методы, средства и приборы, применяемые в машиностроении при исследовании характеристик изделий. Учебное пособие рекомендуется для подготовки магистров и студентов, обучающихся по направлениям 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», профиль «Автоматизация конструкторско-технологической подготовки машиностроительных производств».

Пособие выполнено в соответствии с требованиями Государственного образовательного стандарта.

УДК: 001.891.5.002.56(075.8)
ББК 22.17286я73

© ВоГУ, 2014
© Шкарин Б.А., 2014

ВВЕДЕНИЕ

Испытания машин проводятся с целью экспериментального определения их конструктивных и эксплуатационных свойств для выявления их соответствия техническим требованиям или для опытного изучения реальных процессов, происходящих в машинах.

Испытания машин новых конструкций предназначены для выявления основных качеств машин перед запуском их в производство. Их осуществляют как в лабораторных, так и в эксплуатационных условиях.

Лабораторные (или заводские) испытания, в том числе испытания их отдельных агрегатов и механизмов, проводят в стационарных условиях на специально оборудованных установках (стендах испытательных).

Эксплуатационные или промышленные испытания новых конструкций могут проводиться на специализированных участках, дорогах, полигонах, имитирующих производственные условия, или непосредственно в эксплуатационной обстановке промышленного производства (например, на автомобильном полигоне).

В процессе промышленных испытаний определяют производительность машин при различных режимах работы, действующих силах, скоростях, ускорениях, устанавливают надёжность и долговечность машины и её отдельных элементов, исследуют пусковые свойства, манёвренность, тепловой режим, оценивают экономическую эффективность внедрения машины.

В некоторых случаях проводят **испытания при аварийном режиме** (например, при заклинивании рабочего органа).

По результатам лабораторных и эксплуатационных испытаний составляют соответствующие акты, на основании которых решают вопрос о запуске машины в серийное производство или её доработке.

Испытания машин серийного производства проводят для проверки качества выпускаемых машин и их соответствия техническим требованиям.

В процессе таких испытаний контролируется в основном правильность сборки и соответствие машины своему технологическому назначению.

Научно-исследовательские испытания машин позволяют изучить влияние на работу машины различных факторов, слабо поддающихся предварительной оценке, подтвердить экспериментом отдельные теоретические положения, накопить опытный материал для дальнейшего совершенствования машины.

Объём и длительность различных испытаний, количество измеряемых величин, методы определения и проверки соответствующих параметров указываются в предварительно составленной документации.

При испытаниях машин разных типов пользуются специальными методиками, которые позволяют решать различные конкретные задачи. Например, при испытаниях транспортных машин определяют динамические и тяговые свойства (время и путь разгона, ускорение, максимальную скорость, тяговое и тормозное усилия и т.д.), а также расход топлива, проходимость, управляемость, устойчивость и др.

Испытаниям на долговечность и прочность подвергают механизмы трансмиссий, оси, подвески, рамы, кузова, аппаратуру управления, тормоза и т.д.

При испытаниях электрических машин исследуют электромагнитные, термические, аэродинамические, механические и диэлектрические свойства изготовленных машин.

Испытания металлорежущих станков могут включать проверку точности движения рабочих органов, лёгкости управления, плавности хода, исследование усилий в механизмах подачи, реверса и др., измерение мощности на шпинделе станка, определение производительности при механической обработке различных деталей и т. п.

Особое внимание при испытаниях машин уделяется испытаниям на надёжность.

Являясь составной частью проектной и исследовательской работы по созданию новой техники, испытания машин приобретает всё большее значение как фактор, позволяющий повышать качество машин и сокращать сроки их освоения.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ (ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ)

Различают следующие виды испытаний машин:

- лабораторные;
- заводские;
- эксплуатационные (промышленные, войсковые);
- ходовые;
- лётные;
- дорожные;
- другие.

По назначению испытания машин подразделяются на:

- приёмо-сдаточные;
- контрольные;
- исследовательские;
- другие.

Кроме того, испытания машин подразделяют на:

- испытания новых конструкций;
- проводимые на моделях или натурных образцах (натурные испытания);
- испытания машин серийного производства;
- научно-исследовательские испытания машин.

В процессе научно-исследовательских испытаний машин проводят эксперименты.

Эксперимент – система операций, воздействий и (или) наблюдений, направленных на получение информации об объекте при исследовательских испытаниях.

В теории планирования эксперимента часто определяют эксперимент как совокупность условий и результатов проведения серий опытов.

Опыт – воспроизведение исследуемого явления в определенных условиях проведения эксперимента при возможности регистрации его результатов.

План эксперимента – совокупность данных, определяющих число, условия и порядок реализации опытов.

Планирование эксперимента – выбор плана эксперимента, удовлетворяющего заданным требованиям. Планирование эксперимента – научная дисциплина, занимающаяся разработкой и изучением оптимальных программ проведения экспериментальных исследований.

Фактор (недопустимо – **Параметр**) – переменная величина, по предположению влияющая на результаты эксперимента. В большинстве моделей, используемых в планировании эксперимента, предполагается, что факторы могут рассматриваться как детерминированные переменные.

Уровень фактора – фиксированное значение фактора относительно начала отсчета. Факторы могут различаться по числу уровней, на которых возможно их фиксировать в данной задаче. Фактор, варьируемый на p уровнях, называют p -уровневым фактором.

Основной уровень фактора – натуральное значение фактора, соответствующее нулю в безразмерной шкале. Основной уровень фактора служит для фиксирования в области планирования таких условий эксперимента, которые представляют наибольший интерес для исследователя в данный момент, и относится к определенному плану эксперимента.

Нормализация факторов – преобразование натуральных значений факторов в безразмерные. За единицу масштаба безразмерной системы координат принимается некоторый интервал в натуральных единицах. При нормализации фактора наряду с изменениями масштаба изменяется начало отсчета. С геометрической точки зрения нормализация факторов равноценна линейному преобразованию пространства факторов, при котором производится перенос начала координат в точку, отвечающую основным уровням, и сжатие-растяжение пространства в направлении координатных осей.

Априорное ранжирование факторов – метод выбора наиболее важных факторов, основанный на экспертной оценке. Метод основан на упорядочении экспертами множества факторов по убыванию (или возрастанию) их важности, суммирование рангов факторов и выборе факторов путем рассмотрения суммарного ранжирования.

Размах варьирования фактора – разность между максимальным и минимальным натуральными значениями фактора в данном плане. Указывает границы области варьирования данного фактора в данном эксперименте.

Интервал варьирования фактора – половина размаха варьирования фактора.

Эффект взаимодействия факторов – показатель зависимости изменения эффекта одного фактора от уровней других факторов.

Факторное пространство – пространство, координатные оси которого соответствуют значениям факторов. Размерность факторного пространства равна числу факторов k .

Область экспериментирования (область планирования) – область факторного пространства, где могут размещаться точки, отвечающие условиям проведения опытов. Если область планирования задается интервалами возможного изменения факторов, она представляет собой гиперпараллелепипед (в частном случае куб). Иногда область планирования задается гиперсферой.

Активный эксперимент – эксперимент, в котором уровни факторов в каждом опыте задаются исследователем.

Пассивный эксперимент – эксперимент, при котором уровни факторов в каждом опыте регистрируются исследователем, но не задаются.

Последовательный эксперимент (недопустимо *Шаговый эксперимент*) – эксперимент, реализуемый в виде серий, в котором условия проведения каждой последующей серии определяются результатами предыдущих.

Отклик (недопустимо *Реакция, Параметр*) – наблюдаемая случайная переменная, по предположению, зависящая от факторов.

Функция отклика – зависимость математического ожидания отклика от факторов.

Оценка функции отклика – зависимость, получаемая при подстановке в функцию отклика оценок значений ее параметров.

Дисперсия оценки функции отклика – дисперсия оценки математического ожидания отклика в некоторой данной точке факторного пространства.

Поверхность отклика – геометрическое представление функции отклика.

Поверхность уровня функции отклика – геометрическое место точек в факторном пространстве, которому соответствует некоторое фиксированное значение функции отклика.

Область оптимума – область факторного пространства в окрестности точки, в которой функция отклика достигает экстремального значения.

Рандомизация плана – один из приемов планирования эксперимента, имеющий целью свести эффект некоторого неслучайного фактора к случайной ошибке.

Параллельные опыты – рандомизированные во времени опыты, в которых уровни всех факторов сохраняются неизменными. Параллельные опыты служат для получения выборочной оценки дисперсии воспроизводимости результатов эксперимента.

Временный дрейф – случайное или неслучайное изменение функции отклика во времени. Дрейф обычно связывают с изменением во времени каких-либо характеристик функции отклика (параметров, положения экстремальной точки и т. п.). Различают **детерминированный и случайный дрейфы**. В первом случае процесс изменения параметров (или иных характеристик функции отклика) описывается детерминированной (обычно степенной) функцией времени. Во втором случае изменение параметров – случайный процесс. Если дрейф **аддитивный**, то поверхность отклика смещается во времени, не деформируясь (при этом дрейфует только свободный член функции отклика, т.е. член, не зависящий от значений факторов). При **неаддитивном** дрейфе поверхность отклика во времени деформируется. Цель планирования в условиях аддитивного дрейфа исключить влияние дрейфа на оценки эффектов факторов. При дискретном дрейфе это удастся сделать путем разбиения эксперимента на блоки. При непрерывном дрейфе используют планы эксперимента, ортогональные к дрейфу, описываемому степенной функцией известного вида.

2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАШИН

Эксперименты в машиностроении сопряжены с необходимостью измерения различных физических величин:

- геометрических (линейных размеров и углов, макро- и микроотклонений формы);
- кинематических (скоростей, ускорений, параметров вибрационных процессов);
- силовых и энергетических (усилий, давлений, мощностей);
- тепловых (температур и теплофизических констант);
- технологических (параметров обрабатываемости резанием);
- свойств машиностроительных материалов (прочности, твердости, износостойкости) и параметров их внутреннего строения (структуры).

В зависимости от характера измеряемой величины различают измерения:

- статических величин;
- динамических величин.

По способу получения значений измеряемой величины разделяют измерения:

- прямые;
- косвенные;
- совокупные;
- совместные.

В процессе прямых измерений искомое значение физической величины получают непосредственно, например: измерение массы на весах, температуры ртутным или спиртовым термометром, геометрические измерения с помощью линейно-угловых средств (рис. 2.1) и т.д.

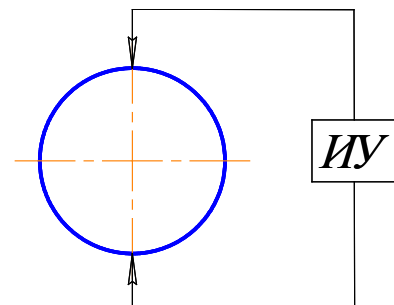


Рис. 2.1. Схема прямого измерения диаметра вала

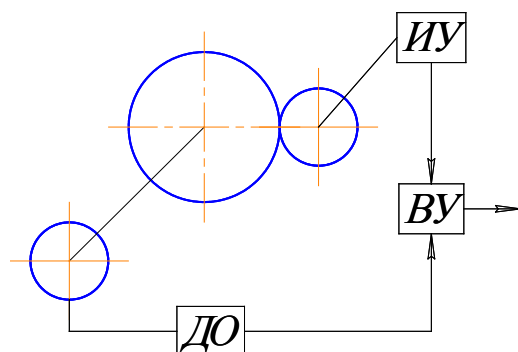


Рис. 2.2. Схема косвенного измерения диаметра вала

При выполнении косвенных измерений определение искомого значения физической величины на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной, например: нахождение температуры резания по термоЭДС в естественной термопаре, удельного электросопротивления проводника по его сопротивлению, длине и площади поперечного сечения, диаметра вала по длине его окружности (рис. 2.2) и т.д.

При **совокупных измерениях** проводятся одновременно измерения нескольких одноименных величин, а искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях, например, измерение массы отдельных гирь сравнением масс сочетания гирь.

В процессе **совместных измерений** проводятся одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для определения зависимости между ними. Например, измерения, при которых электросопротивление при $T=20^{\circ}\text{C}$ и температурные коэффициенты измерительного резистора находят по данным прямых измерений его сопротивления при различных температурах.

Принцип измерения – совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Методы измерения – совокупности приемов использования принципов и средств измерения.

Средство измерения – техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Измерительные преобразователи – технические устройства, осуществляющие преобразования величин и образующие канал передачи измерительной информации.

Методы измерения – совокупности приемов использования принципов и средств измерения. Классификация методов измерения приведена на рис.2.3.

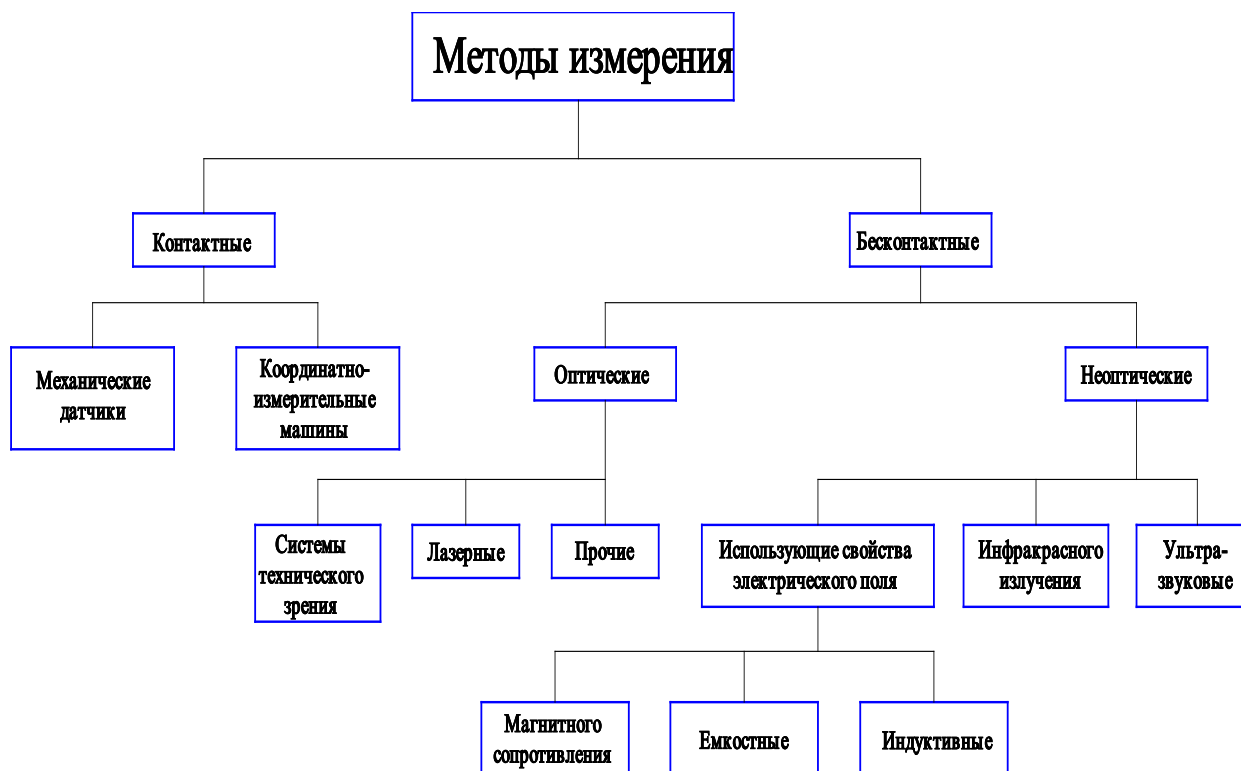
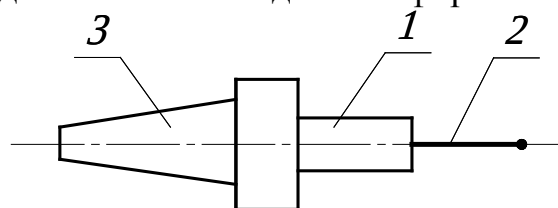


Рис. 2.3. Классификация методов измерения

2.1. Контактные измерения

Контактные методы измерений осуществляются с помощью механических датчиков. Схема датчика фирмы Reneshow:



- 1 – датчик;
- 2 – чувствительный шуп датчика;
- 3 – посадочный конус.

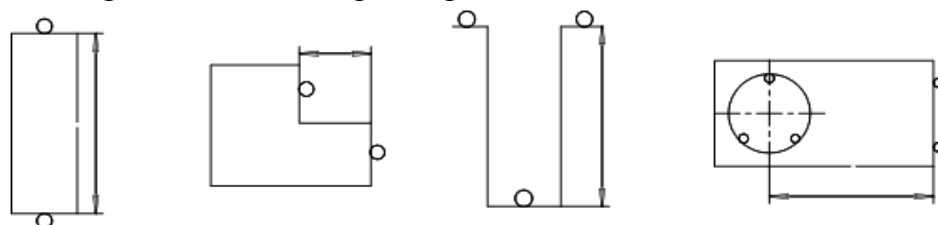
Основные области применения механических датчиков:

- контроль деталей в процессе обработки;
- автоматическая коррекция положения инструмента для компенсации погрешностей станка;
- определение положения "нулевой" точки инструмента в системе координат станка;
- контроль инструмента для определения его износа или работоспособности.

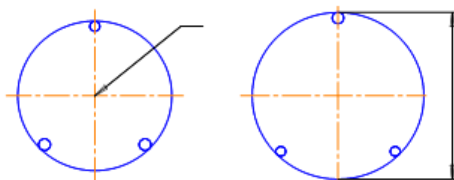
Типовые задачи, решаемые с помощью датчиков типа Reneshow:

- измерение размеров и углов;
- обнаружение смещения изделий;
- измерения изделий и режущих инструментов с целью внесения коррекции в управляющую программу;
- идентификация изделий.

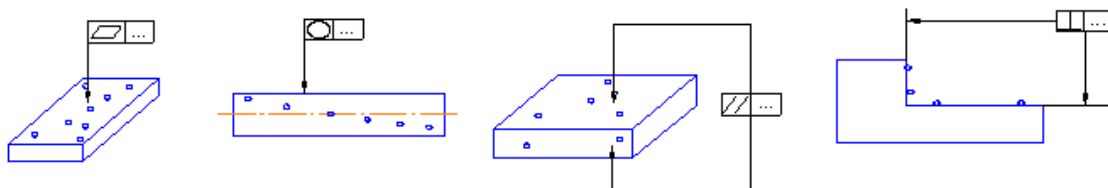
Схемы контроля линейных размеров:



Схемы определения центра круга, диаметра круга:



Схемы определения неплоскостности, некруглости, непараллельности, перпендикулярности:



Примеры измерения некруглости (рис. 2.4., 2.5.):

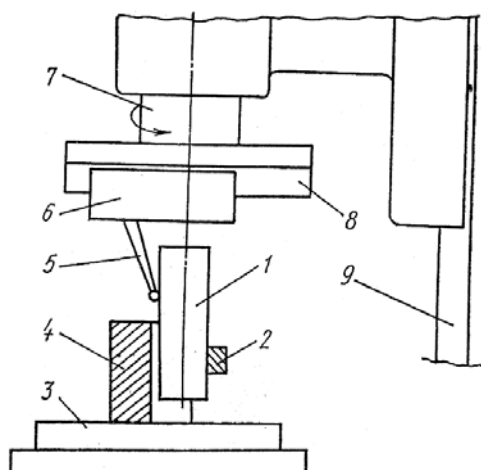


Рис. 2.4. Схема измерения некруглости методом образцового вращения

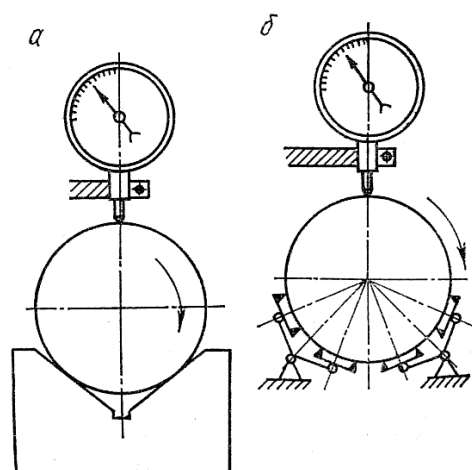


Рис. 2.5. Схемы измерения некруглости: а - в призме; б - в самоустанавливающейся многозвенной призме

Примеры измерения неплоскостности и непрямолинейности (рис.2.6.-2.8.):

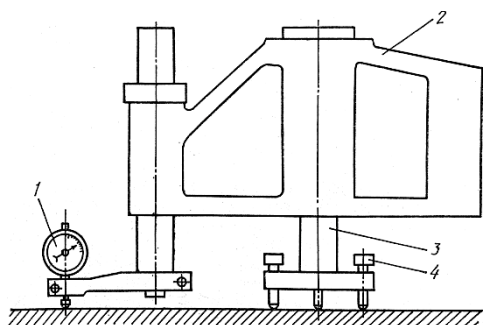


Рис. 2.6. Схема карусельного плоскомера

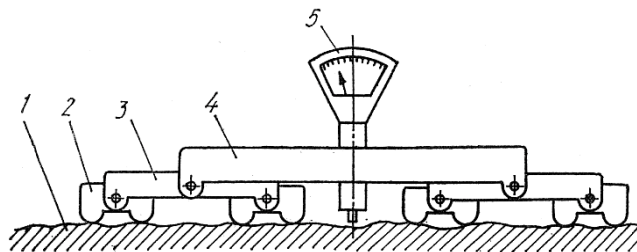


Рис. 2.7. Накладной плоскомер

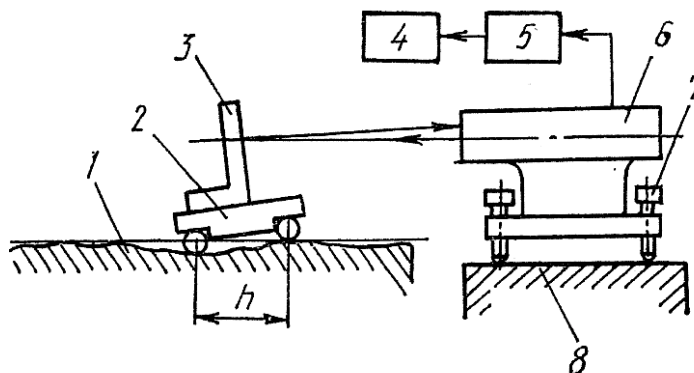


Рис. 2.8. Схема измерения непрямолинейности с помощью автоколлиматора

Пример измерения параметров шероховатости:

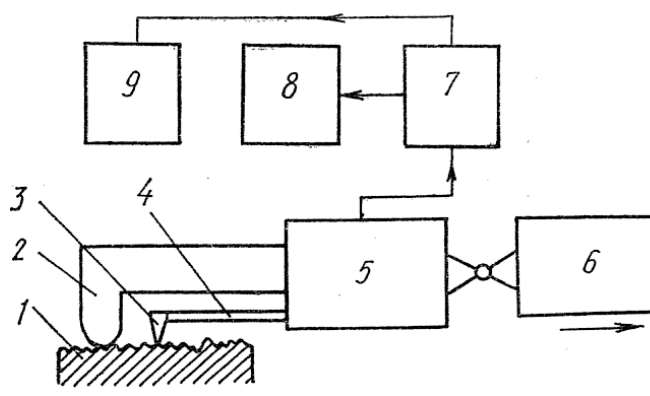
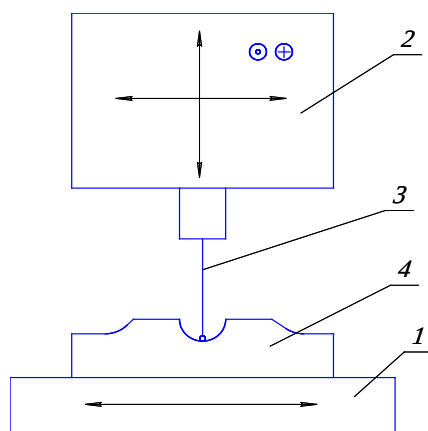


Рис. 2.9. Схема измерения параметров шероховатости методом оцупывания

Координатно-измерительные машины управляются системами ЧПУ, отличаются высокой точностью измерений, но требуют специальных условий для выполнения измерений (например, отдельных термоконстантных помещений).

Схема контрольно-измерительной машины:



- 1 – рабочий стол;
- 2 – измерительная головка;
- 3 – измерительный щуп;
- 4 – контролируемое изделие

Многие предприятия стали проявлять большой интерес к новым, современным мобильным координатно-измерительным машинам. Это происходит вследствие того, что при использовании стационарных контрольно-измерительных машин (КИМ) возникает проблема невозможности контроля неподвижных и крупногабаритных объектов, проведения замеров в ходе технологического процесса, а также достижения специальных условий эксплуатации.

Мобильные КИМ отвечают следующим требованиям:

- низкая стоимость – на порядок ниже, чем у стационарных КИМ;
- высокая точность измерений;
- высокая мобильность;

- возможность автономной работы в условиях реального производства;
- простота в обучении персонала и эксплуатации КИМ и ее программного обеспечения;
- взаимосвязь с современными CAD/CAM системами.

Мобильные КИМ обеспечивают быстрый и всесторонний контроль деталей, оснастки, заготовок, а также используются при получении прототипов будущих изделий.



Рис. 2.10. Состав мобильных КИМ

КИМ состоит из опорной плиты, которая крепится к любому подходящему месту и нескольких, соединенных между собой шарнирами, колен. Конструкция очень похожа на строение человеческой руки. У КИМ так же есть своеобразные кистевой, локтевой и плечевой суставы. В каждом шарнире есть датчик контроля угловых перемещений, который в режиме реального времени следит за углом поворота колена, в результате чего программное обеспечение просчитывает координаты откалиброванного щупа – своеобразного пальца (рис. 2.11).



Рис. 2.11. Различные положения откалиброванного щупа КИМ

Все перемещения колен и фиксация точки замера производятся оператором вручную. Измерение осуществляется в комплексе с персональным компьютером.

В зависимости от числа колен имеются машины с 6-ю или 7-ю степенями свободы.

Рабочей зоной КИМ является сфера с диаметрами 1,2м, 1.8м, 2,4м, 3.0м, 3.7м, причем щуп может попасть практически в любую точку внутри этой сферы.

Процесс измерения с помощью мобильных КИМ осуществляется следующим образом:

- КИМ устанавливают вблизи измеряемого объекта, подключают компьютер и с помощью программного обеспечения калибруют щуп, которым будут производиться измерения;
- задается система координат, относительно которой будут производиться измерения ("привязаться к детали"). Чаще всего осуществляется "привязка" по точкам на плоскостях, отверстиях, цилиндрических поверхностях и т.д. Оператор с помощью КИМ указывает эти точки на контролируемой детали;
- осуществляется процесс измерения изделия. Контроль производится контактным способом, т.е. для снятия какой-либо точки необходимо зафиксировать щуп на изделии и нажать кнопку на "руке" КИМ.

В процессе работы на экран монитора выводится местоположение щупа в реальный момент времени, расположение измеряемых точек и величина их отклонения.

Все построения производятся по правилам контроля тех или иных параметров.

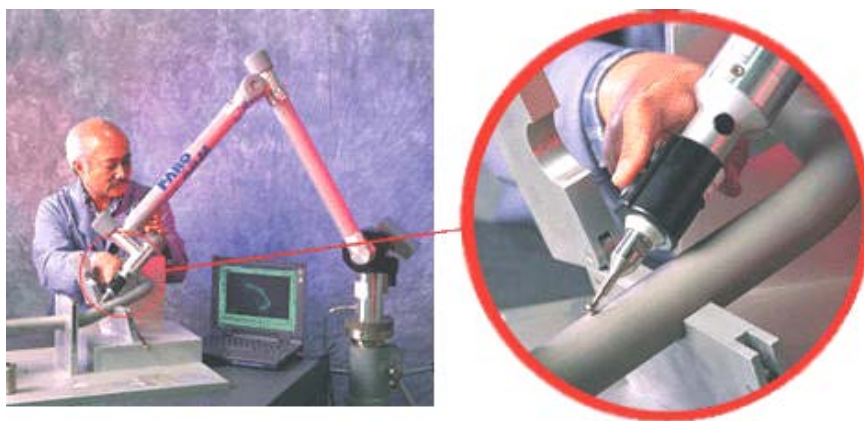


Рис. 2.12. Пример выполнения измерений с помощью мобильных КИМ

Измеряя объект, можно посмотреть все данные о нем: отклонение от номинальной величины, координаты относительно базы, положение относительно других объектов изделия, отклонение от плоскостности, цилиндричности, соосности и т.д. и получить отчет в графическом виде.

Крепление мобильных КИМ производится вблизи измеряемого объекта под любым углом от 0 до 180 гр. несколькими способами:

- с помощью струбцин, например на столе;
- с помощью магнитных и быстросъемных соединительных креплений;
- используя складные треноги;
- используя стойки на роликах с убирающимися колесами, которые могут применяться для любой "руки" КИМ и имеют регулировку по высоте в зависимости от модели.

Проблема ограниченности радиуса действия КИМ при анализе крупногабаритных деталей решается несколькими способами:

- использование измерительной "руки" с максимальным радиусом действия;
- использование дискретного перемещения КИМ с привязками.

Первоначально машина привязывается к одной части измеряемого изделия (по базам). Для того чтобы передвинуть КИМ и продолжить измерение в ранее недоступной зоне, замеряются и сохраняются несколько точек (от 3 и более). Далее, после "прыжка", машина привязывается к этим точкам, тем самым совмещая систему координат с предыдущей, и измерения продолжают. Таких прыжков может быть произведено неограниченное количество, причем по всем координатам. Это позволяет проникать в самые труднодоступные места и производить измерения такой сложности, которые осуществить другими методами либо крайне трудоемко, либо невозможно;

- использование большого набора щупов, как точечных, так и шариковых, различной длины и формы оправок для измерения в труднодоступных местах.

Масса мобильных КИМ, в зависимости от исполнения, колеблется от 5 до 10 кг, используется удобная для перевозки упаковка.

Правильность изготовления формообразующих поверхностей штампов, прессформ, литейных форм практически невозможно проверить ни одним прибором, кроме КИМ. Для контроля подобных изделий необходимо использовать 3D-модель.



Гибридные КИМ сочетают возможности контактного и бесконтактного метода сканирования и измерения изделий, выполняя контроль сложных криволинейных поверхностей путем сравнения полученного облака точек и 3D-модели.

Это стало возможным благодаря интеграции мобильной КИМ и лазерного сканера. Контактный щуп и сканирующая головка могут работать поочередно.

Рис. 2.13. КИМ FARO Laser Line Probe V3

Основные технические характеристики КИМ FARO Laser Line Probe V3:

- низкая стоимость – на порядок ниже, чем у стационарных КИМ;
- высокая точность измерений;
- высокая мобильность;
- возможность автономной работы в условиях реального производства;
- простота в обучении персонала и эксплуатации КИМ и ее программного обеспечения;
- взаимосвязь с современными CAD/CAM системами;
- использовать измерительную "руку" с максимальным радиусом действия;
- использовать большой набор щупов, как точечных, так и шариковых, различной длины и формы оправки, для измерения в труднодоступных местах;
- точность: 0,035 мм (без учета точности КИМ FARO Arm);
- эффективная ширина сканирования: от 34 до 60 мм;
- скорость сбора данных: 30 кадров в секунду, 640 точек в кадре, до 19200 точек в секунду;
- дистанция сканирования: от 95 до 180 мм;
- вес сканирующей головки: 370 грамм;

- компенсация перепадов температуры, стабильность оптических параметров;
- электропотребление: 85-245 В, 50/60 Гц ;
- рабочий диапазон температур: от +10 до +40 °С;
- температурный цикл: 3 °С/ 5 мин;
- влажность: 95% без конденсата;
- калибровка: постоянная;
- защита: соответствует стандарту IP 64;
- максимальная вибрация: от 55 до 2000 Гц (IEC 68-2-27);
- удар и сотрясение: 6 ms (IEC 68-2-27);
- полная совместимость с любой 7-и осевой FARO Arm.

Часто мобильные КИМ используют для сканирования опытных образцов изделий. Данные можно получить в виде точек, линии, сплайнов, полилинии, окружностей, плоскостей, по которым в дальнейшем с помощью специального программного обеспечения строится CAD модель.



Рис. 2.14. Контроль линейно-угловых размеров



Рис. 2.15. Контроль диаметров



Рис. 2.16. Отклонение формы цилиндра



Рис. 2.17. Оцифровка моделей



Рис. 2.18. Оцифровка сложной геометрии



Рис. 2.19. Монтаж оснастки



Рис. 2.20. Монтаж оборудования



Рис. 2.21. Монтаж производственной линии

2.2. Бесконтактные оптические методы и средства измерений



Оптиметры работают по принципу оптического рычага. При перемещении измерительного наконечника изображение шкалы (цена деления 1 мкм), наблюдаемое в окуляр, смещается относительно неподвижного индекса. Для повышения точности отсчета применяется окулярный спектральный микрометр.

Оптиметр состоит из стойки с кронштейном, измерительного устройства с осветительной системой и набора сменных предметных столов.

Рис. 2.22. ИКВ-3 оптиметр вертикальный проекционный

Технические характеристики оптиметра ИКВ-3

Характеристики	Значения
Пределы измерения по шкале, мкм	± 100
Цена деления шкалы, мкм	1
Наибольшая величина измеряемого изделия, мм	200
Измерительное усилие при наружных измерениях, Н	2 (200 гс)

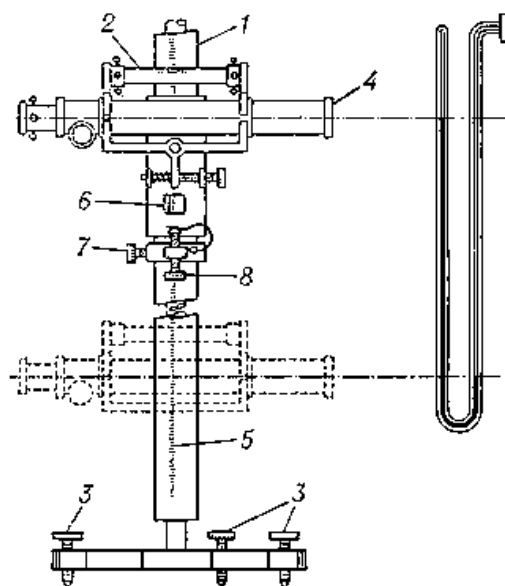
Измерительные микроскопы (рис. 2.23) предназначены для измерения линейных и угловых размеров резьбовых изделий, режущего инструмента, профильных шаблонов, лекал, кулачков, метчиков, резьбонарезных гребенок, диаметров отверстий и др. Используется проекционный метод измерений (в проходящем и отраженном свете). Измеряемая деталь может базироваться в центрах или на стекле стола.

Катетометры предназначены для измерения линейных размеров изделий, не доступных для непосредственного измерения. Прибор для измерения вертикального расстояния между двумя точками, которые могут и не лежать на одной вертикали. Катетометр состоит из штанги, устанавливаемой вертикально при помощи уровня и трёх уравнивательных винтов, горизонтально расположенной зрительной трубы, которая может перемещаться вдоль штанги, оставаясь параллельной самой себе, и приспособлений для точного наведения трубы. Окуляр трубы снабжен перекрещивающимися нитями. При работе пересечение нитей трубы последовательно наводят на каждую из выбранных точек, а искомое расстояние определяют по смещению трубы вдоль шкалы, имеющейся на штанге.

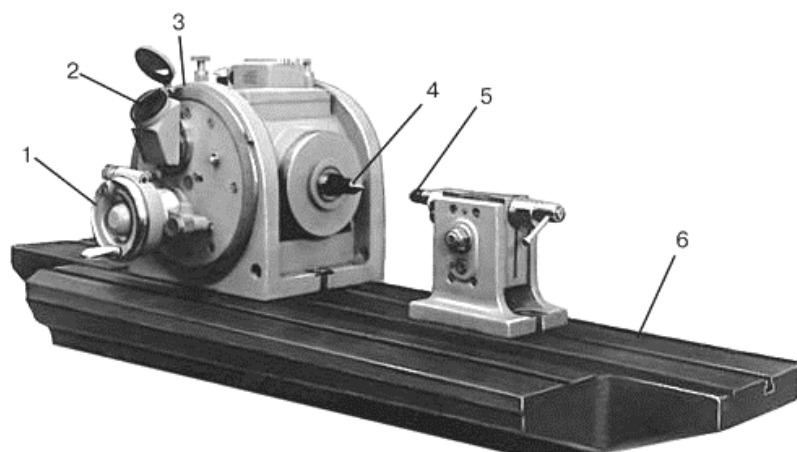
- 1 – штанга; 2 – уровень;
- 3 – уравнивательные винты;
- 4 – зрительная труба; 5 – шкала;
- 6 – нониус;
- 7 – винт для предварительной наводки;
- 8 – винт для точной наводки трубы.



Рис. 2.23. Измерительный микроскоп ММ-400/800



Оптические делительные головки используют для измерения центральных углов. Цена деления от 2 секунд до 1 минуты:



- 1 – блок настройки;
- 2 – оптический окуляр;
- 3 – шкала;
- 4 и 5 – центры для установки детали;
- 6 – стол

Лазерный интерферометр (рис. 2.24) применяется для измерения длины и линейных перемещений.

Излучение лазера 8 через коллиматор 9 идет на светоделительный кубик 10, который направляет часть излучения на подвижное зеркало, связанное с объектом измерения 1, а другую часть – на неподвижное зеркало 11. Отраженные от этих зеркал составляющие излучения интерферируют на разделительной плоскости кубика 2 и через щелевые диафрагмы 3 и 7 направляются на фотоприемники 4 и 6, которые преобразуют колебания интенсивности освещенности в соответствующее изменение электрического сигнала на их выходе, которое фиксируется отсчетным устройством 5.

В этой схеме шероховатость поверхности измеряемого объекта может значительно искажать интерференционное поле и уменьшать точность измерений.

Такого недостатка нет у устройства (рис. 2.25), где используется геометрическое кодирование геометрической информации.

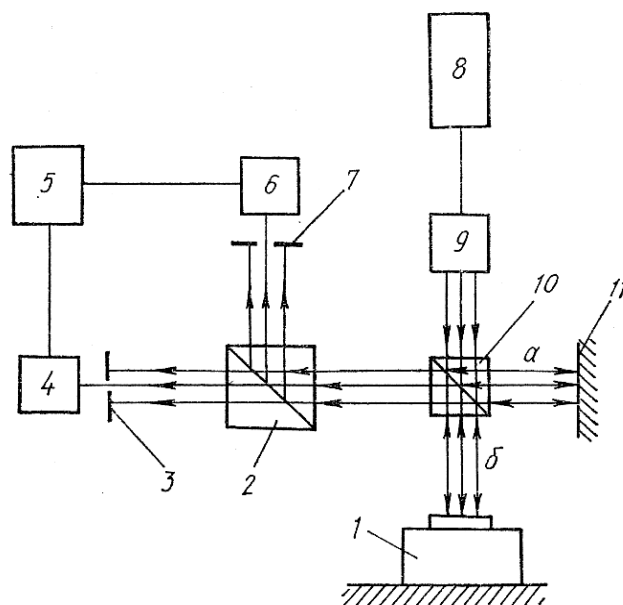


Рис. 2.24. Схема лазерного интерферометра

Устройство выполнено в виде двух блоков: оптико-электронного преобразователя и цифрового блока. Осветитель 1 с помощью щелевой диафрагмы 2 и проецирующего объектива 3 создает на поверхности измеряемой детали световой штрих. Изображение этого штриха через приемный объектив 4 по-

падает на светочувствительную поверхность линейного формирователя видеосигналов (ЛФВС) 5, в котором происходит преобразование светового потока в электрический сигнал. При изменении размера детали, большего или меньшего номинального, световой штрих будет отклоняться в ту или иную сторону, засвечивая светочувствительные элементы с меньшими или большими порядковыми номерами. В блоке 10 происходит определение положения середины светового штриха на ЛФВС. Блок усреднения 7 позволяет получать средние значения размера по результатам нескольких измерений (до 10).

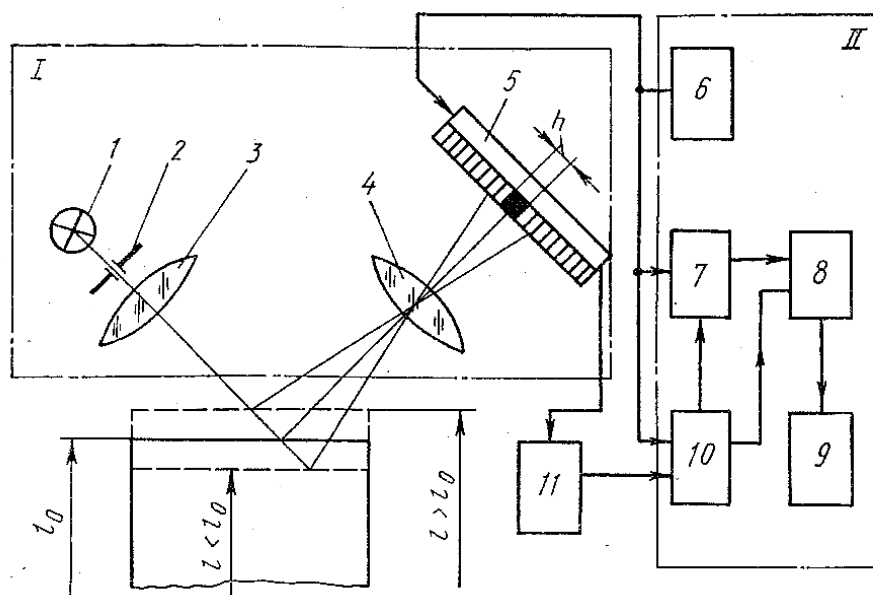


Рис. 2.25. Оптико-электронное устройство для измерения линейных размеров

В блоке 8 вычисляется фактический размер детали, который индицируется в блоке индикации 9. Работой управляет тактовый блок управления 6, который обеспечивает наложение электрических сигналов на светочувствительных элементах в зависимости от энергии падающего на них светового потока и их отвод на приемный блок 11.

Измерение шероховатости поверхностей может осуществляться с использованием интерферометров (рис.2.26.- 2.27).



Рис. 2.26. Лазерный интерферометр X



Рис. 2.27. Внешний вид интерферометра ФТИ-100 PS

Бесконтактное измерение шероховатости осуществляется 3 методами:

- светового сечения;
- теневой проекции;
- с использованием интерференции.

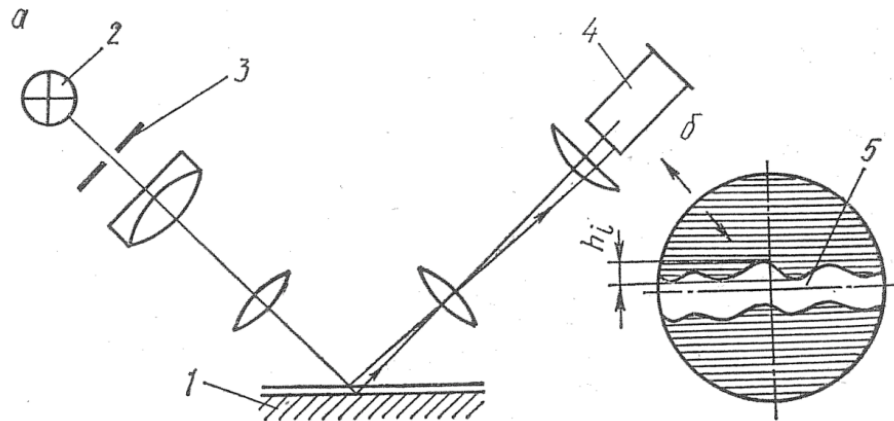


Рис. 2.28. Схема измерения параметров шероховатости методом светового сечения

Через осветительную диафрагму 3 контролируемая поверхность освещается узкой полоской света от источника 2. В поле зрения микроскопа 4 видна картинка, показанная на рис. 2.28 б. Высота микронеровностей измеряется от визирной линии 5 микроскопом 4.

Метод теневой проекции отличается тем, что граница между светом и тенью создается острием ножа.

При интерференционном методе поверхность рассматривается в микроскоп. На изображении поверхности возникают интерференционные полосы, по искривлению которых судят о шероховатости.

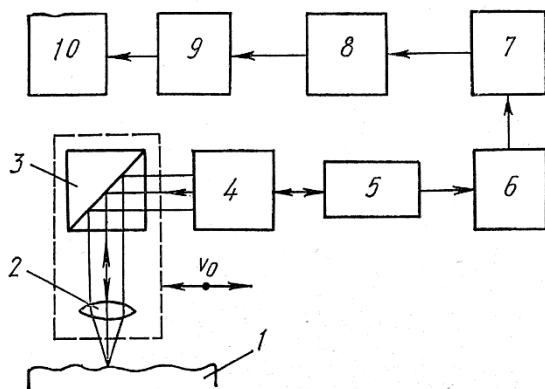


Рис. 2.29. Блок-схема лазерного профилографа

Основной недостаток этих методов – большая трудоемкость измерений.

Этого недостатка лишены методы измерений шероховатости с использованием лазера (рис. 2.29).

Выходное излучение лазера 5 после прохождения телескопической системы 4 направляется на сканирующее устройство, перемещающее сфокусированное излучение лазера вдоль измеряемой поверхности с постоянной скоростью. Сканирующее устройство состоит

из кубика 3 с отражающей поверхностью и микрообъектива 2, позволяющего сфокусировать на измеряемой поверхности 1 лазерный пучок до 6...8 мкм. Отраженное излучение приобретает доплеровский сдвиг частоты. После вто-

ричного прохождения через сканирующее устройство и резонатор лазера отраженное излучение принимается фотоприемником 6, с которого электрический сигнал проходит через амплитудный ограничитель 7 и узкополосный усилитель 8 и поступает на частотный детектор 9, выходной сигнал которого 9, выходной сигнал которого поступает на интегрирующий усилитель 10, формирующий напряжение, пропорциональное мгновенному значению высот микронеровностей.

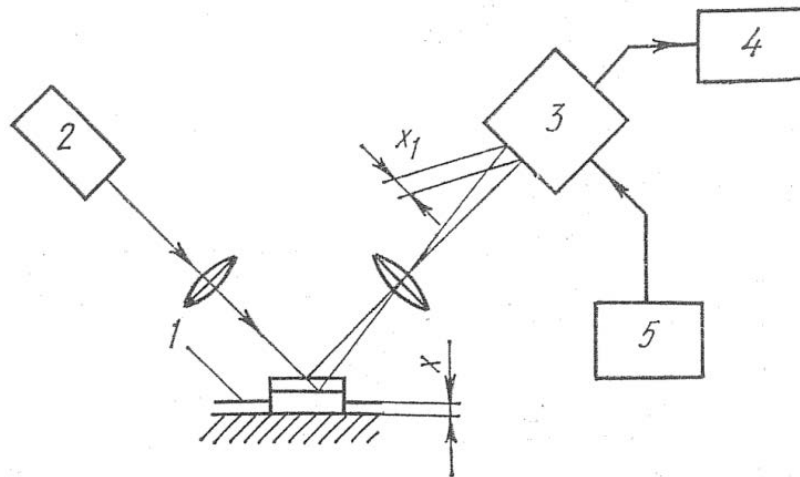


Рис. 2.30. Схема лазерного прибора для измерения виброперемещения

Принцип работы лазерного измерительного преобразователя для измерения виброперемещений основан на пространственном смещении отраженного луча лазера 2, направленного под углом на колеблющийся объект 1. Это смещение, пропорциональное отклонению X объекта, обрабатывается позиционно-чувствительным фотоприемником 3 и измерительной схемой 4. В случае медленных смещений к фотоприемнику подключается модулятор 5, частота которого в 5...10 раз больше максимальной частоты колебаний объекта измерений. Минимальные значения виброперемещений, обнаруженные данным методом – 0,5мкм.

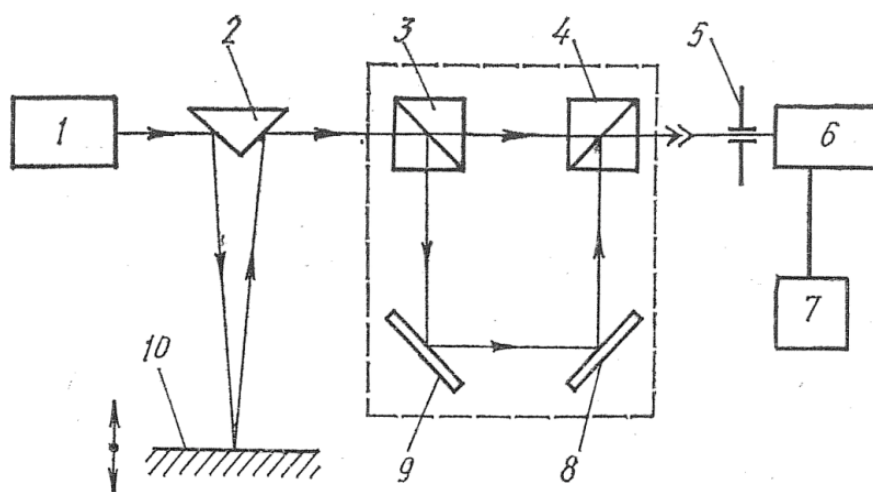


Рис. 2.31. Блок-схема лазерного измерительного преобразователя виброскорости

Излучение лазера 1, направляемое зеркалом 2 на поверхность колеблющегося объекта 10, модулируется по частоте в результате эффекта Доплера и попадает в интерферометр (обведен штриховой линией), где делится призмой 3 на 2 пучка, проходящих из-за несимметрии плеч разным путем (рис. 2.31). Первый пучок идет прямо к соединительной призме 4, а второй проходит более длинный путь от призмы 3 через зеркала 9 и 8. Соединяемые в призме 4 пучки создают интерференционную картину, перемещающуюся в результате изменения частоты отраженного излучения в ту или иную сторону. Щелевая диафрагма 5 позволяет получать на выходе фототок, пропорциональный виброскорости объекта, который регистрируется преобразователем 7.

Системы, основанные на оптических бесконтактных методах измерений еще называют **системами технического (машинного) зрения**, телевизионными системами с микропроцессорным управлением.

Типовая система технического зрения (СТЗ) состоит из оптического устройства (телевизионной камеры, матрицы фотодиодов), ЭВМ и устройства их сопряжения. Аппаратные и программные средства СТЗ формируют изображение и осуществляют его анализ путем сравнения с эталонными данными, хранящимися в памяти ЭВМ. Принцип восприятия информации в СТЗ показан на рис. 2.32.

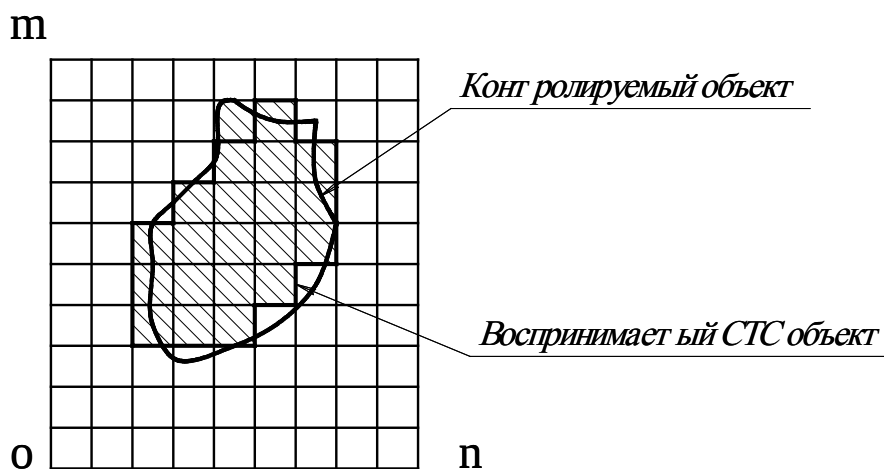


Рис. 2.32. Принцип восприятия информации в системах технического зрения

Основным элементом СТЗ является матрица воспринимающих элементов (например, фотодиодов) размером $m \times n$. При наличии объекта между матрицей и осветительным элементом часть фотодиодов освещается, вырабатывая при этом электрический сигнал. Этот сигнал анализируется, на основании чего вырабатывается сигнал измерения.

Точность измерения зависит от количества воспринимающих элементов, приходящихся на единицу площади матрицы. Современные СТЗ позволяют осуществлять измерения с точностью до сотых и даже тысячных долей мм.

Кроме измерений, СТЗ используются в ГПС для решения еще одной, очень важной задачи – распознавания образов (например, идентификация используемых в ГПС заготовок, деталей и инструментов).

Образ – множество объектов, объединенных общими свойствами (например, конфигурацией).

Изображение – каждый конкретный объект из множества объектов, объединенных в образ.

Термин "распознавание образов" означает отнесение конкретного изображения к определенному образу – так называемое восприятие изображения.

Системы восприятия СТЗ делятся на 2 основных класса:

- системы полного восприятия – неискаженное (полное восприятие), например, это системы передачи, хранения и обработки видеoinформации;
- системы ограниченного восприятия, в которых только нескольким элементам информационного поля ставится в соответствие один элемент внутреннего представления.

Большинство СТЗ, предназначенных для решения задачи распознавания, относится к классу систем ограниченного восприятия, так как внутреннее представление образов должно быть таким, чтобы лишь идентифицировать объект без точного его восприятия. Очевидно, что это позволяет значительно упростить СТЗ и уменьшить их стоимость.

СТЗ позволяют решить следующие задачи:

- распознавание;
- идентификация;
- обнаружение;
- поиск изображений по содержанию;
- оценка положения;
- оптическое распознавание знаков;
- определение движения;
- слежение;
- восстановление изображения.

Структура СТЗ:

- набор камер, являющихся оконечными датчиками системы;
 - устройство преобразования видеoinформации;
 - устройство обработки и отображения (ПК, программируемые логические контроллеры ПЛК);
 - алгоритм обработки.
- Помимо этих основных элементов, могут также присутствовать дополнительные блоки, превращающие систему сбора и обработки информации в интеллектуальную систему контроля и управления:

- устройства и алгоритмы управления положением камер или объектов (применяются при восстановлении 3D сцен);
- устройства автоматической фокусировки камер;
- устройства структурированной подсветки (используются для формирования на объекте контроля характерной цветовой или яркостной картины при бесконтактном контроле геометрии);
- элементы системы автоматической калибровки.

Измерительные задачи, решаемые с помощью СТЗ:

- измерение геометрических размеров объектов (в т.ч. крупногабаритных);
- измерение характеристик перемещений конечных и бесконечных (лента, прокат) объектов;
- определение шероховатости поверхностей;
- высокоточное измерение параметров внешних резьб (шаг, высота, углы, натяг);
- контроль взаимного расположения объектов в составе сборки (контроль геометрии тележек вагонов после ремонта);
- определение параметров отдельных частиц (размер, скорость перемещения) в составе потока.

Для идентификации этикеток или небольших рисунков и надписей предназначен датчик F10, сочетающий в себе функции фотодатчика и системы распознавания (рис. 2.33).



Рис. 2.33. Датчик



Рис. 2.34. Система F150-3

Система технического зрения серии F150-3 (рис. 2.34) позволяет сравнить изображение предмета с заданным изображением для задач контроля качества, идентификации, определения размеров и положения объектов. Имеется:

- до 11 входов и 21 выходов;
- память на 23 изображения.

Интеллектуальный датчик Omron ZFV (рис. 2.35) – это система обработки изображений. В процессе эксплуатации на монитор в режиме реального времени выводятся результаты измерений и изображения.



Рис. 2.35. Датчик Omron ZFV

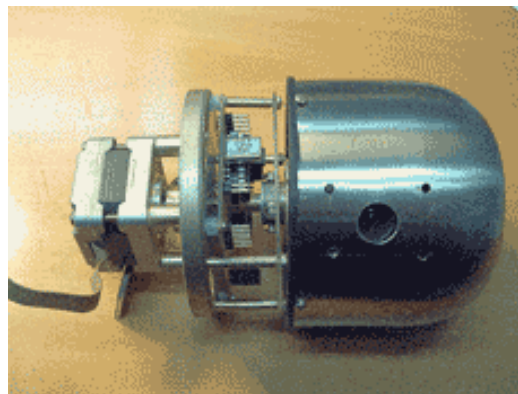


Рис. 2.36. Система "ВИКОНТ 1У"

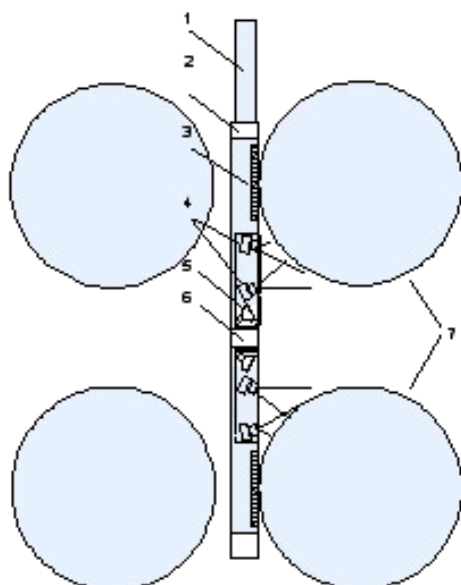
Система видеоконтроля конических отверстий "ВИКОНТ 1У" (рис. 2.36) предназначена для визуального наблюдения внутренней поверхности конических и цилиндрических тел (деталей). Диапазон диаметров отверстий – 125 – 163 мм.

Система видеоконтроля конических отверстий представляет собой эндоскоп, содержащий в себе устройство доставки и головную часть. Устройство доставки с центрирующим устройством позволяет удерживать головную часть на одной оси с отверстием во всем диапазоне диаметров.

Для удовлетворительной освещенности внутренней поверхности применяется искусственная подсветка. Головная часть может вращаться в пределах 360 градусов. На головной части эндоскопа расположены видеокамеры прямого и бокового обзора. Видео сигнал от обеих камер оцифровывается и поступает в ЭВМ. Эндоскоп дает возможность визуально обнаружить дефекты внутренней поверхности при наблюдении камерой прямого обзора. Используя устройство доставки и вращение боковой камеры, проводится детальное наблюдение дефекта. Глубина положения эндоскопа и угол поворота головной части контролируется ЭВМ.

Система видеоконтроля конических отверстий является аппаратно программным комплексом. Аппаратная часть системы состоит из устройства доставки, головной части блока видео наблюдения и ЭВМ. Программная часть включает в себя модуль отображения видеоинформации, систему управления положением эндоскопа и состоянием подсветки, базу цифровых изображений.

Автоматизированная система бесконтактного измерения раствора валков МНЛЗ на базе системы технического зрения высокого разрешения (рис.2.37) является современным решением метрологической задачи определения геометрии сложных тел.



Система предназначена для удаленного высокоточного контроля раствора валков в машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) в период технического обслуживания машины. Дополнительной функциональной возможностью прибора является определение диаметра валка в точке измерения.

Рис. 2.37. Схема автоматизированной системы бесконтактного измерения растров валков:

*1 – держатель; 2 – первый измерительный блок;
3 – магнит; 4 – СТЗ; 5 – осветитель;
6 – кожух "линейки"; 7 – валки*

Основной особенностью прибора, отличающей его от аналогов, устанавливаемых на затравках, является компактность его измерительной части (22x45x1200 мм), позволяющая устанавливать прибор сверху через зазор между группами валков. Фиксация измерителя на валках производится при помощи магнитов.

Состоит из малогабаритного промышленного планшетного компьютера и измерительной "линейки".

Измерительная "линейка" (рис. 2.38) состоит из телескопического коленчатого держателя и двух измерительных блоков, разнесенных на расстояние (150-320 мм) в зависимости от базового зазора между валками в машине. Измерительный блок представляет собой калиброванную высокоточную систему технического зрения, состоящую из двух камер и осветителя. Коленчатый держатель позволяет устанавливать линейку внутри группы валков, проникая через зазор между крайними валками группы.



Рис. 2.38. Измерительный прибор системы в сборе

На компьютере, наряду с необходимыми вычислениями, производится отображение картинки с камер. На каждое изображение программно наносятся метки установки. При правильной установке система выдает соответствующий сигнал. Это позволяет визуально контролировать положение "линейки" относительно края валков, тем самым многократно упрощая процесс установки датчика.

Для определения расстояния между валками используется принцип штангенциркуля, заключающийся в измерении границ объекта перпендикулярно базовой плоскости. Для нахождения положения границы валка относительно плоскости соприкосновения датчика с роликом (базовая плоскость) используются две камеры, каждая из которых находит границу относительно

своего местоположения на "линейке". Далее, используя данные о взаимном расположении камер (определяемых при калибровке) и наклоне линейки, вычислитель находит реальные границы валков относительно плоскости соприкосновения с ними датчика. Побочным результатом вычислений является диаметр валков в точке измерения.

2.3. Бесконтактные неоптические методы измерений

Бесконтактные неоптические методы измерений основаны на использовании электрических или магнитных свойств магнитного поля.

В зависимости от используемых свойств магнитного поля применяются следующие датчики:

- датчики магнитного сопротивления для определения присутствия объекта (например, наличие инструмента); имеется ограничение – изделие должно быть магнитопроводящим;
- датчики емкостного сопротивления, определяющие емкостное сопротивление пары объект – зонд;
- индуктивные датчики, измеряющие магнитное поле, создаваемое в объекте;
- датчики инфракрасного излучения применяются для измерения температуры объектов;
- ультразвуковые датчики, осуществляющие анализ отраженных ультразвуковых колебаний объекта.

Индуктивные приборы (рис. 2.39) отличаются высокой точностью, пригодны для дистанционных измерений, легко связываются с ЭВМ для обработки результатов измерений.

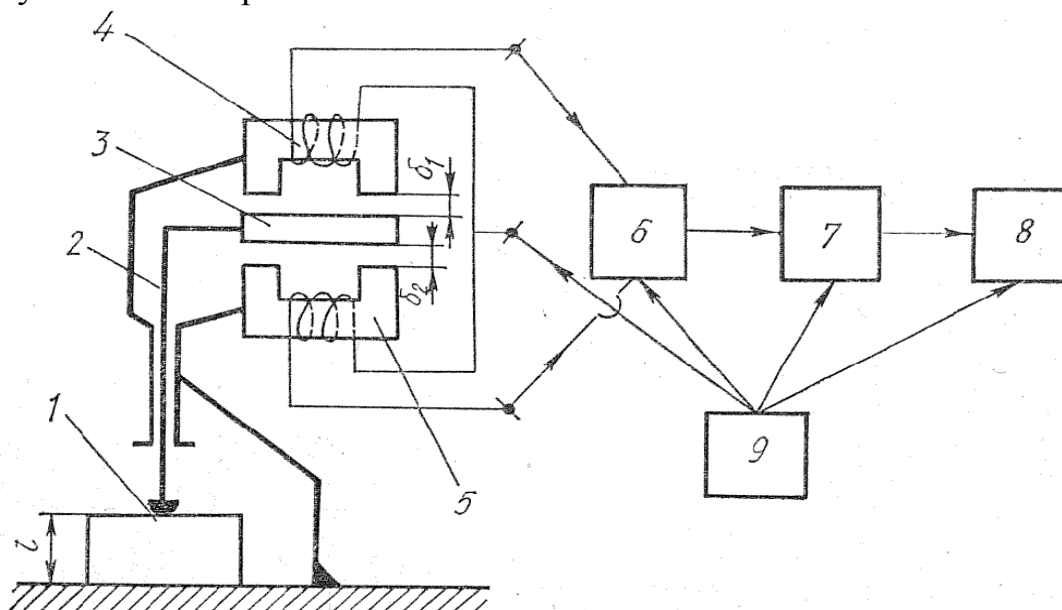


Рис. 2.39. Схема индуктивного прибора с дифференциальным преобразователем: 1-объект измерений; 2-шток; 3-якорь; 4,5-катушки; 6-мостовая измерительная схема; 7-усилитель; 8-регистрирующее устройство; 9-источник питания.

Используется свойство катушки индуктивности изменять реактивное сопротивление при перемещении якоря. Для этого якорь выполняется подвижным. Перемещение якоря связывается с измеряемой линейной или угловой величиной.

Преобразователи соленоидного типа (рис 2.40) используются для больших перемещений.

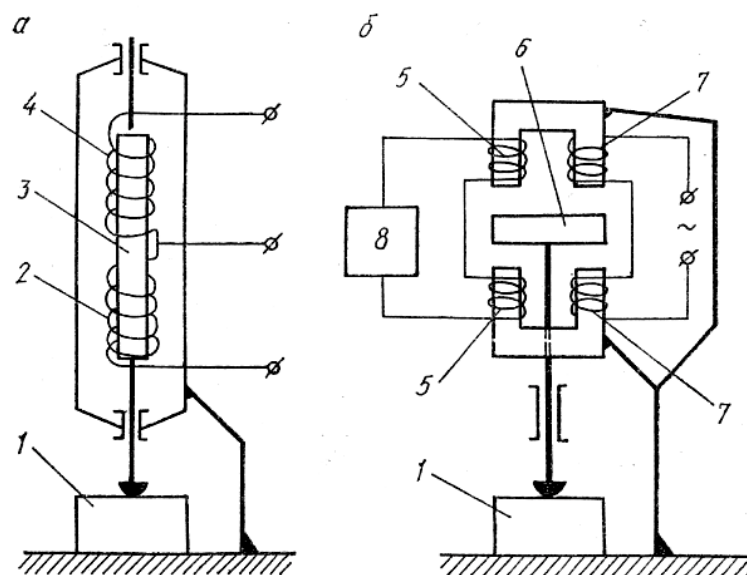


Рис. 2.40. Дифференциальные индуктивные преобразователи:
а – соленоидного типа; б – трансформаторного типа

Механотрон (рис. 2.41) – это диод, у которого расстояние между анодом и катодом изменяется в результате воздействия на анод измеряемого объекта.

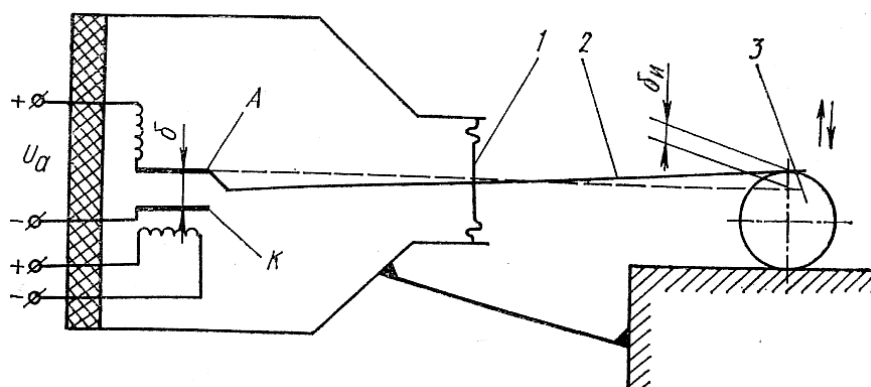


Рис. 3.41. Схема механотрона

Перемещение анода передается рычагом 2, закрепленным на мембране. 1. Диапазон измерений $\pm 0,1$ мм, точность $\pm 0,04$ мкм.

Ультразвуковые приборы основаны на использовании колебаний ультразвукового диапазона. Применяют, в основном, для измерения толщины объектов, когда нет доступа к одной из противоположных поверхностей объекта контроля.

Методы ультразвукового контроля:

- эхо-метод;
- резонансный метод.

При использовании эхо-метода (рис. 2.42) измеряется время прохождения ультразвукового импульса через слой, толщину которого измеряют.

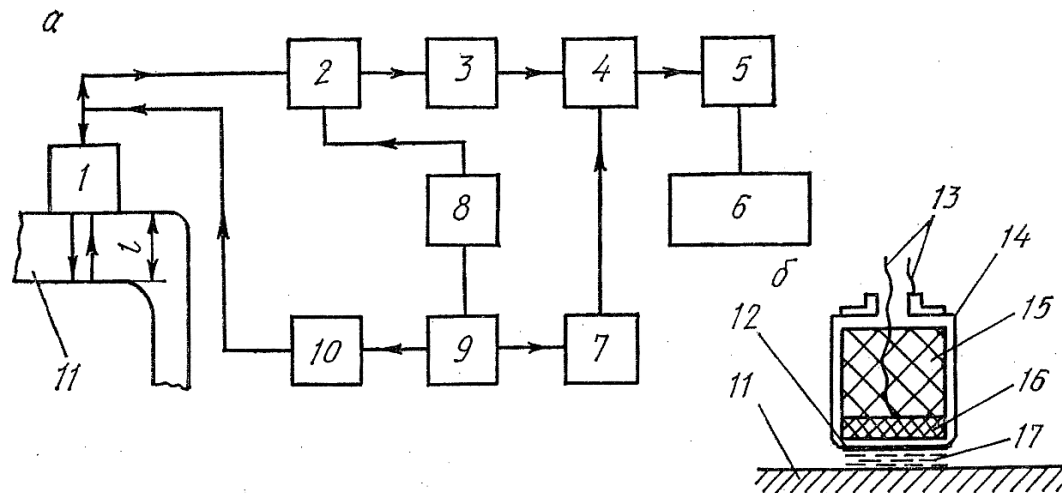


Рис. 2.42. Эхо-импульсивный толщиномер:

а - блок-схема; б - схема совмещённого пьезоэлектрического искателя

Второй метод основан на явлении резонанса в контролируемом объекте. Минимальная толщина объектов 0,2-0,3 мм при абсолютной погрешности измерения 0,1-0,2 мм. Максимальная толщина – 20-100 мм.

Импульс ультразвукового излучения генератора пройдя от искателя путь 1, отражается противоположной стороной стенки объекта 11 и возвращается в искатель 1, откуда передается в приемник 2. Усилитель 3 передает сигнал в измерительный триггер 4, в который поступает сигнал от генератора развертки 7. Блок временной регулировки чувствительности 8 обеспечивает уменьшение чувствительности приемника 2 в момент излучения зондирующего импульса и для ее восстановления. Для повышения точности используют усилитель 5. Регистрация сигнала осуществляется индикатором 6. Искатель 1 преобразует электромагнитные колебания в ультразвуковые, излучает ультразвуковые волны в изделие, принимает отраженные волны и преобразует их в электромагнитные.

Совмещенный пьезоэлектрический искатель состоит из пластины 16, которая приклеена или прижата к демпферу 15. Между пьезопластиной и объектом 11 может располагаться несколько промежуточных слоев 12 и прослойка смазочного материала 17. Искатель размещен в корпусе 14. Выводы 13 соединяют пьезопластину с генератором 10 и приемником 2.

Портативные, переносные установки серии IntraSpect™ (рис. 2.43) предназначены для 100% автоматизированного ультразвукового и вихретоко-



Рис. 2.43. Система визуализации дефектов IntraSpect™

зивного износа, ручейковой и канальной коррозии.

Ультразвуковые толщиномеры (рис. 2.44) измеряют время, которое затрачивает ультразвуковой импульс на прохождение до противоположной поверхности объекта контроля, отражение от нее и возвращение на преобразователь.

Для проведения таких измерений доступ к противоположной поверхности объекта контроля не требуется. Благодаря этому, если противоположная поверхность объекта контроля является труднодоступной или полностью недоступной, необходимость разрезать объект контроля (что требуется при использовании микрометра или штангенциркуля) отсутствует.

Ультразвуковые дефектоскопы, используя те же самые принципы отражения ультразвука, обнаруживают эхосигналы, отражающиеся от трещин, пустот или других нарушений сплошности материала, из которого выполнен объект контроля.

Ультразвуковой импульс распространяется в твердом однородном материале (например, стенке стальной трубы) до тех пор, пока не сталкивается с границей с другим материалом (например, воздухом в трещине или воздухом, с которым граничит противоположная поверхность стенки трубы).

Дефектоскоп отображает информацию об амплитуде и положении эхосигналов, которая может быть использована для классификации дефектов. Сравнивая эхосигналы от опорного образца и от реального объекта контроля, опытный оператор может обнаружить скрытые дефекты задолго до того, как возникнет реальная неисправность.

Одной из наиболее важных областей применения ультразвуковых дефектоскопов является контроль качества сварки. Индикатор глубины распространения трещин, трещиномер СС-800В (рис. 2.45) – портативный специали-

вого контроля состояния объектов, позволяют сканировать поверхности различной формы (плоские и цилиндрические) в любом пространственном положении, выявлять дефекты в труднодоступных и опасных для человека местах.

Решают такие задачи дефектоскопии, как: обнаружение дефектов в сварных швах и основном металле, измерение толщины стенки и выявление очагов коррозионного и абразивного износа, ручейковой и канальной коррозии.



Рис. 2.44. Ультразвуковой толщиномер

зированный прибор, предназначенный для быстрого и точного измерения потенциальным методом глубины распространения и протяженности поверхностных трещин во всех ферромагнитных и неферромагнитных материалах.



Рис. 2.45. Трещиномер СС-800В



Рис. 2.46. Датчик трещиномера

Используется на плоских и цилиндрических поверхностях диаметром более 51 мм. Наиболее рекомендуется для измерения на грубых поверхностях и в плохих условиях работы.

Пневматические измерительные приборы применяются для линейных измерений методом сравнения с эталоном (рис. 2.47).

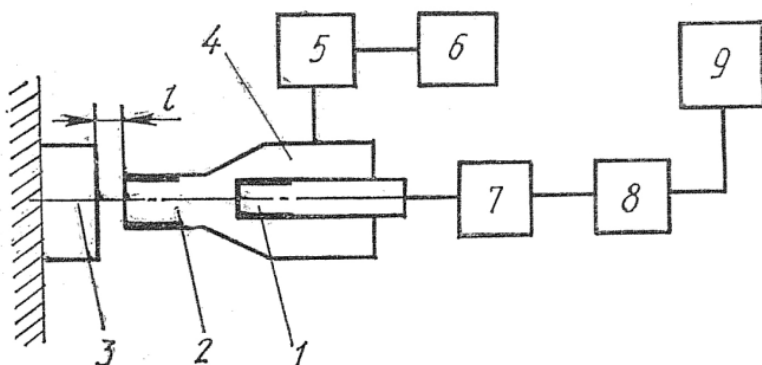


Рис. 2.47. Блок-схема эжекторного прибора для измерения линейных размеров

Сжатый воздух истекает из сопла 1 в измерительное сопло 2 и далее через кольцевой зазор в атмосферу. Давление в измерительной камере 4 зависит от величины зазора l . Давление измеряется и регистрируется устройствами 5 и 6.

2.4. Методы и средства измерения параметров движения

Для **измерения частоты вращения** используются тахометры:

- центробежные тахометры;
- тахометры на вихревых токах.

В центробежных тахометрах вращающийся маятник отклоняется под действием центробежной силы и через рычажную систему приводит в движение стрелочный механизм.

Тахометр на вихревых токах имеет вращающийся постоянный магнит, поле которого возбуждает вихревые токи в алюминиевом диске, соединенном с указателем. Возникающий при этом вращающий момент пропорционален частоте вращения магнита, и указатель перемещается до тех пор, пока этот момент не уравновесится моментом пружины возврата.

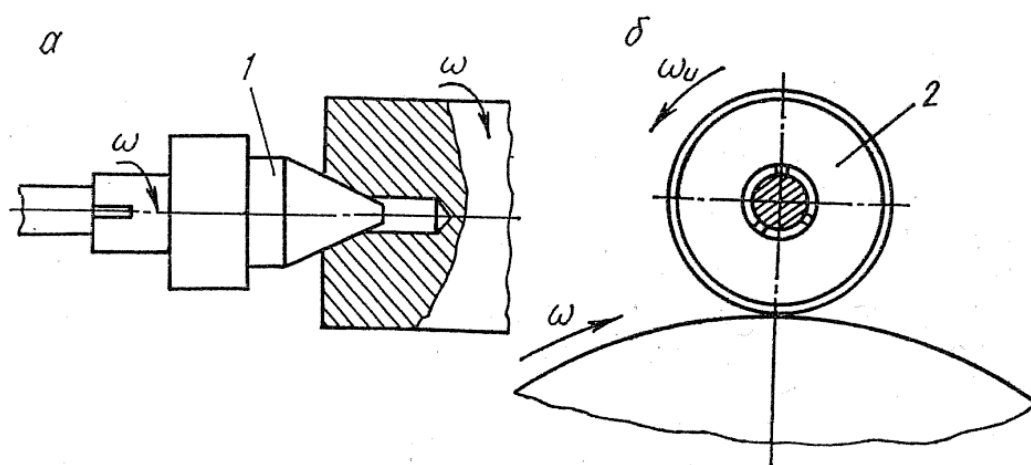


Рис. 2.48. Способы соединения тахометра с объектом:

а – при помощи резинового наконечника 1;
б – при помощи обрезиненного ролика 2

Тахометры с тахогенераторами вырабатывают сигнал, пропорциональный измеряемой частоте вращения, который может передаваться дистанционно.

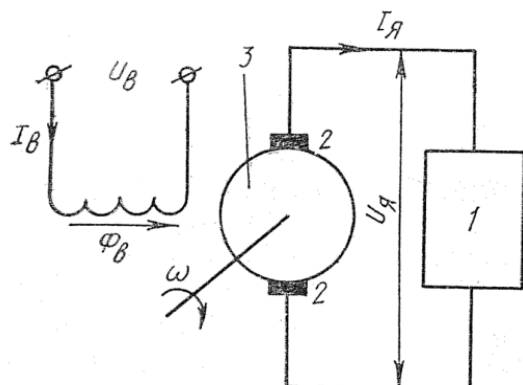


Рис. 2.49. Схема тахогенератора

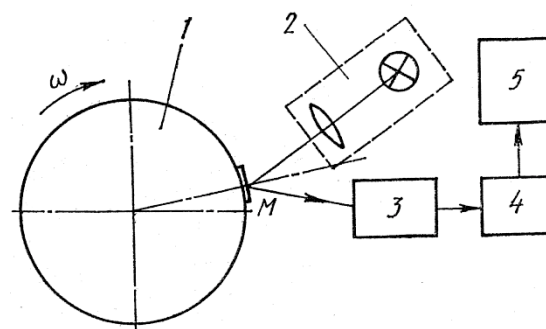


Рис. 2.50. Схема бесконтактного фото-электрического тахометра

Выходное напряжение на зажимах 2 якоря 3 зависит от частоты вращения якоря при постоянном потоке возбуждения Φ_v и постоянном сопротивлении нагрузки в показывающем индикаторе 1.

Бесконтактные тахометры обладают наилучшими эксплуатационными характеристиками.

На вращающийся объект 1 (рис. 2.50) наносится метка М. Отраженные от нее импульсы от источника света 2 воспринимаются фотоприемником 3, частотный детектор 4 вырабатывает сигнал, который преобразуется в удобную форму преобразователем 5.

Тахогенераторы также используются для измерения скорости линейного движения, которое с помощью зубчато-реечного или фрикционного зацепления превращается во вращательное.

Особой областью является *измерение характеристик механических колебаний*.

Механические колебания – периодическое изменение во времени параметров движения (перемещение, скорость, ускорение). Различают детерминированные и стохастические колебания. При стохастических колебаниях процесс описывается случайной функцией и является следствием случайной совокупности различных причин.

Цель измерения механических характеристик колебаний – получение информации об амплитуде, частоте и фазе параметров движения.

В случае измерения характеристик стохастических колебаний определяются статистические оценки параметров движения: дисперсия, среднее значение максимальных и минимальных отклонений, вероятность выбросов, корреляционные и спектральные функции.

Применяют механические, электрические и оптические измерительные приборы.

Предельная измеряемая частота зависит от жесткости пружины и приведенной массы щупа с пером.

В электрических приборах измерительная цепь состоит из измерительного преобразователя, преобразующего механические колебания в электрические сигналы, усилителя сигналов и регистрирующего прибора. Для избирательного измерения сигнал подается на анализатор.

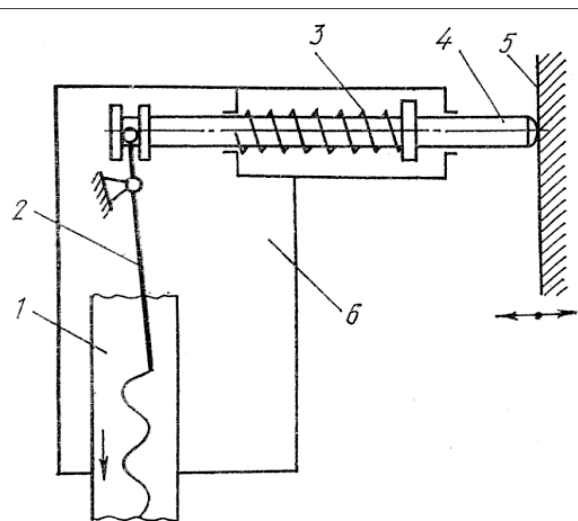
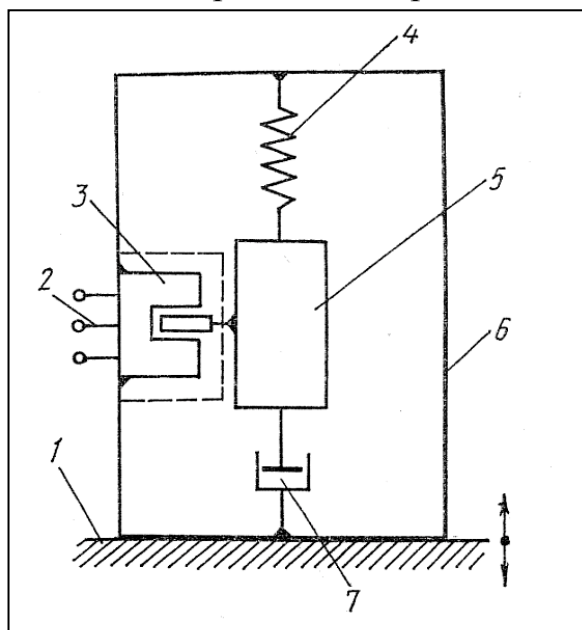


Рис. 2.51. Схема измерения вибраций механическими приборами:
1-лента; 2-пишущее перо; 3-пружина;
4-механический щуп; 5-объект измерения; 6-корпус

Корпус 6 крепится к объекту измерения 1. При колебаниях инерционный элемент 5 стремится сохранить состояние покоя. Его перемещение под действием силы пружины зависит от соотношения собственной частоты колебаний груз-пружина и измеряемой частоты вибраций. Относительные перемещения корпуса и инерционного элемента фиксируются индуктивным преобразователем 3.



Одновременно с этим инерционный элемент 5 стремится сохранить состояние покоя. Его перемещение под действием силы пружины зависит от соотношения собственной частоты колебаний груз-пружина и измеряемой частоты вибраций. Относительные перемещения корпуса и инерционного элемента фиксируются индуктивным преобразователем 3.

Рис. 2.52. Схема измерительного преобразователя абсолютных виброперемещений: 1-объект измерения; 2-выходные провода; 3-индуктивный преобразователь; 4-пружина; 5-инерционный элемент; 6-корпус; 7-демпфер

Кроме индуктивных, применяются электродинамические, электромагнитные и трансформаторные преобразователи (акселерометры), сигнал которых пропорционален ускорению.

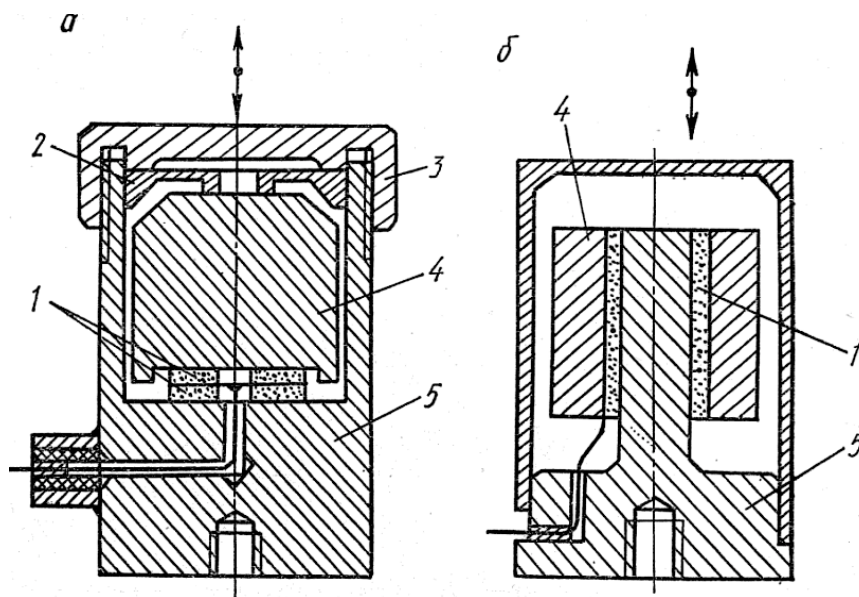


Рис. 2.53. Пьезоэлектрические акселерометры: 1-пьезоэлемент; 2-тарельчатая пружина; 3-крышка; 4-инерционный элемент (груз); 5-корпус

2.5. Методы и средства измерения силовых и энергетических величин

Обеспечивают измерение сил, крутящих моментов и мощности.

2.5.1. Измерение сил

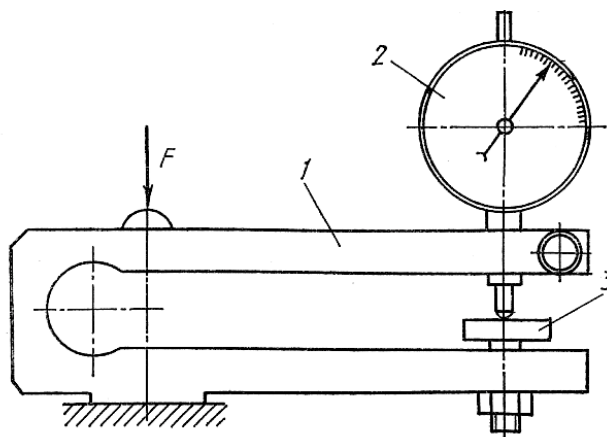
Используются физические эффекты, в которых имеет место линейная зависимость между механической нагрузкой на чувствительный элемент преобразователя и другими величинами (упругой деформацией, электрическим разрядом, магнитной проницаемостью и др.).

В большинстве методов используется линейная зависимость между силой и упругой деформацией пружинных элементов.

Упругий элемент вместе с приданными ему элементами (механическими и электрическими), выполняющими функции преобразователя, образует преобразователь силы (динамометр).

Механические динамометры (рис. 2.54) применяют преимущественно для единичных измерений постоянных сил в тех случаях, когда требования к точности сравнительно невелики.

Рис. 2.54. Схема механического динамометра: 1-скоба; 2-индикатор часового типа; 3-винт с контргайкой (для установки на нуль)



Электрические динамометры получили наибольшее распространение, т.к. они пригодны для измерения сил в большом диапазоне значений (от 5Н до 10 Мн) и имеют небольшую погрешность измерения (до 0,03%).

Тензорезисторный преобразователь больших сил (рис. 2.55) включает тензорезисторы 3, которые наклеиваются на специально подготовленные места упругого элемента 1. Корпус 2 обеспечивает защиту терморезисторов и закрепление выводных проводов.

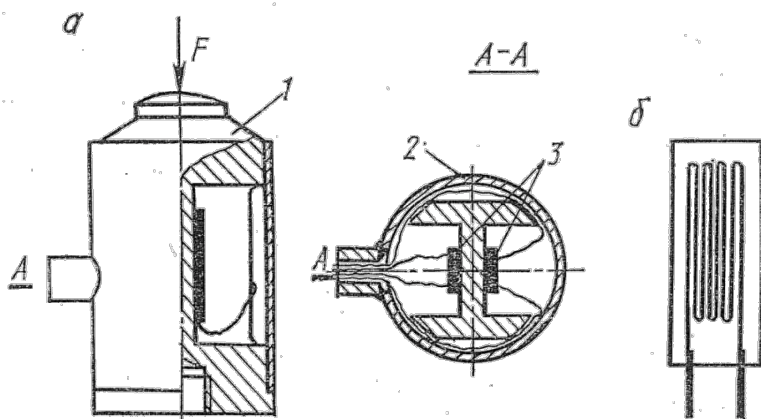


Рис. 2.55. Тензорезисторный измерительный преобразователь больших сил

Для измерения относительно небольших сил применяют чувствительные элементы, которые работают на изгиб (рис. 2.56).

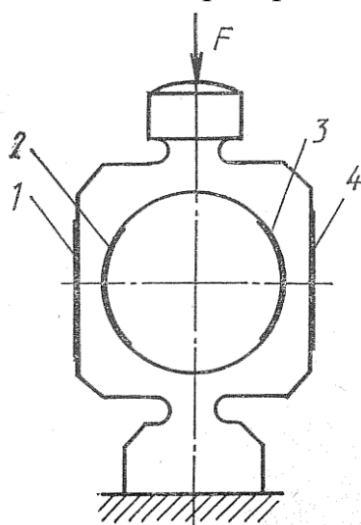


Рис. 2.56. Тензорезисторный измерительный преобразователь небольших сил

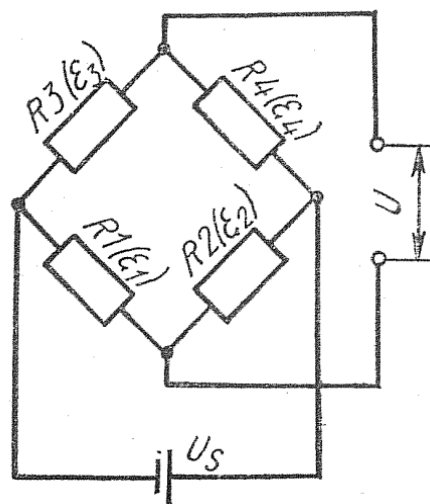


Рис. 2.57. Мостовая схема включения тензорезисторов

Тензорезисторы включаются в измерительную (обычно мостовую или полумостовую схему).

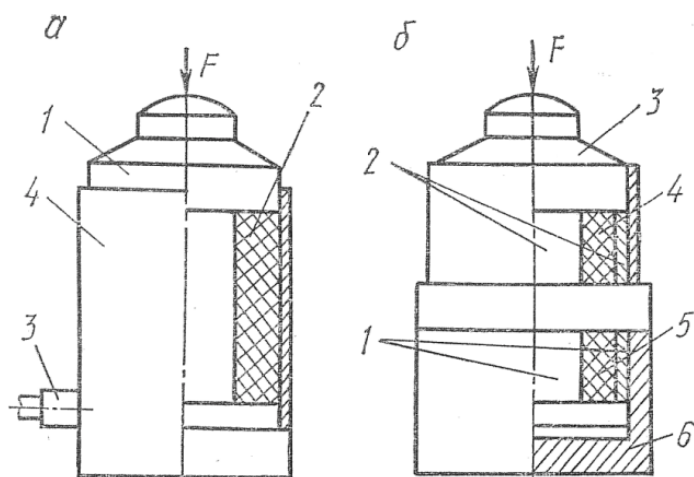


Рис. 2.58. Магнитоупругие дроссельные измерительные преобразователи усилий

В магнитоупругих дроссельных преобразователях (рис. 2.58) сердечник чувствительного элемента 1 под действием усилия F сжимается. При этом изменяется его магнитная проницаемость (или индукция), следовательно изменяется индуктивное сопротивление измерительной катушки 2. Магнитный поток замыкается через кожух 4, котором смонтирован вывод 3 для проводов.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи обычно применяют для измерения динамических сил. На рис. 2.59. приведена схема так называемой «Измерительной шайбы».

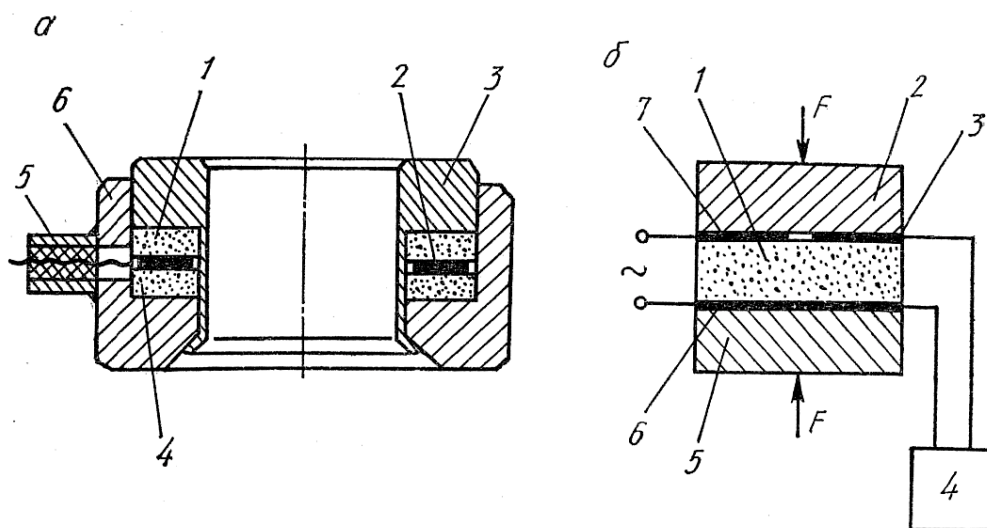


Рис. 2.59. Пьезоэлектрические измерительные преобразователи;
а – для измерения переменных сил; б – постоянных сил

При нагружении силой вдоль оси на поверхности кварцевых пластинок 1 и 4 появляется пропорциональный нагрузке электрический заряд. Элементы 3 и 6 шайбы создают предварительное нагружение пластинок за счет завальцовки, что необходимо для повышения жесткости вибропреобразователя. Пластины кварца прилегают друг к другу гранями противоположной полярности и включены в электрическую сеть параллельно. Сигнал с электрода 2 снимается проводником через вывод 5 и при помощи усилителя преобразуется в соответствующее электрическое напряжение. Такой преобразователь позволяет измерять динамические силы высоких частот (до 100кГц), причем погрешность измерения не превышает 1%.

Для измерения статических и медленно, непериодически изменяющихся сил применяются пьезоэлектрические резонаторы или пьезоэлектрические трансформаторы (рис. 2.59 б). Он представляет собой пьезоэлемент 1 с тремя электродами 7, 3 и 6, образующими две системы. Часть, подключенную к источнику питания, называют возбудителем, а часть, подключенную к измерительной схеме 4, – генератором. В возбудителе переменный ток за счет обратного пьезоэффекта преобразуется в энергию акустических волн, которые, зарождаясь на границах электродов, распространяются по всему объему трансформатора. В генераторе механическое напряжение за счет прямого пьезоэффекта преобразуется в электрический сигнал. Пьезоэлемент с электродами помещен между демпфирующими прокладками 2 и 5. Под действием измеряемого усилия фактическая площадь упругого контакта между поверхностями пьезоэлемента и демпфирующих прокладок. Входное напряжение генератора пропорционально площади контакта.

2.5.2. Измерение крутящих моментов

Механические преобразователи крутящего момента (рис. 2.60) применяются, в основном, в стендах, предназначенных специально для измерения крутящих моментов.

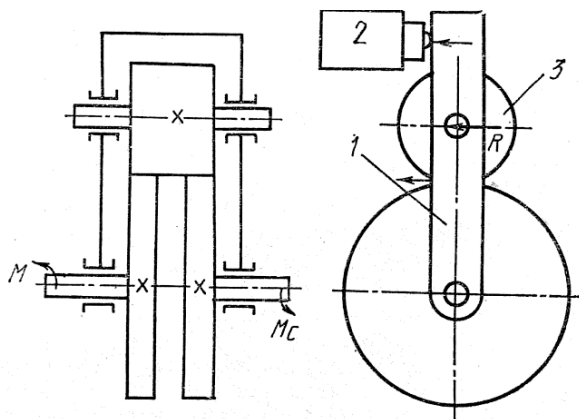


Рис. 2.60. Механический преобразователь крутящего момента

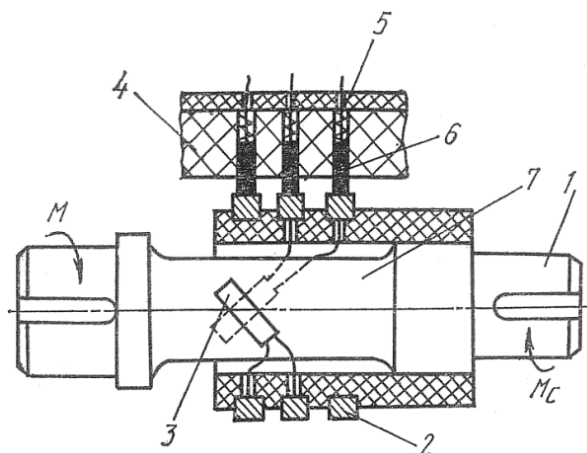


Рис. 2.61. Тензорезисторный измерительный преобразователь крутящего момента

Под действием крутящего момента M и момента сопротивления M_c в опорах шестерни 3 возникает реакция R , пропорциональная измеряемому моменту. Рычаг 1, в котором расположены опоры шестерни 3, опирается одним концом на динамометр 2, с помощью которого измеряется крутящий момент.

Тензорезисторный преобразователь крутящего момента (рис. 2.61) имеет широкий диапазон измерения (от 10 Нм до 50 Кнм).

Цилиндрический чувствительный элемент 7 закручивается под действием приложенного к нему момента. Возникающие при этом деформации служат мерой крутящего момента на валу 1 и воспринимаются тензорезисторами 3, которые приклеивают к чувствительному элементу под углом 45 градусов

и включают в мостовую схему через контактные кольца 2 и съемные щетки 6, прижимаемые к кольцам пружинами 5.

Бесконтактный индуктивный измерительный преобразователь крутящего момента (рис. 2.62) состоит из ротора и статора.

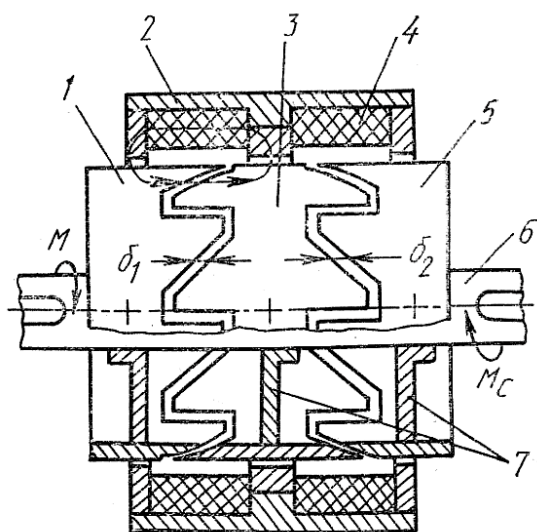


Рис. 2.62. Бесконтактный индуктивный измерительный преобразователь крутящего момента

Ротор состоит из торсионного вала 6, к которому при помощи трех дисков 7 из немагнитной стали крепятся три цилиндра 3, 1 и 5 из мягкой магнитной стали. Эти цилиндры являются частями магнитопроводов, разъединенными зазорами δ_1 и δ_2 между косыми зубцами, и при нагрузке 1 и 5 смещаются относительно цилиндра 3, при этом один из зазоров увеличивается, а другой уменьшается, за счет чего изменяется магнитное сопротивление магнитопровода и соответственно изменяется сопротивление цепи измерительных катушек 2 и 4, которые соединены по дифференциальной схеме.

Фотоэлектрический измерительный преобразователь момента (рис. 2.63) состоит из торсионного вала 1, на котором закреплены диски 8 с радиальными прорезями, которые вращаются вместе с валом. На статоре неподвижно укреплены: источник света 5, диафрагмы 3 и 6 с узкой щелью и фотоэлементы 2 и 7. При приложении крутящего момента происходит сдвиг щелей, и освещение обоих фотоэлементов будет неодновременным, вследствие чего их фототоки будут сдвинуты по фазе, которые измеряются с помощью измерительной схемы 4.

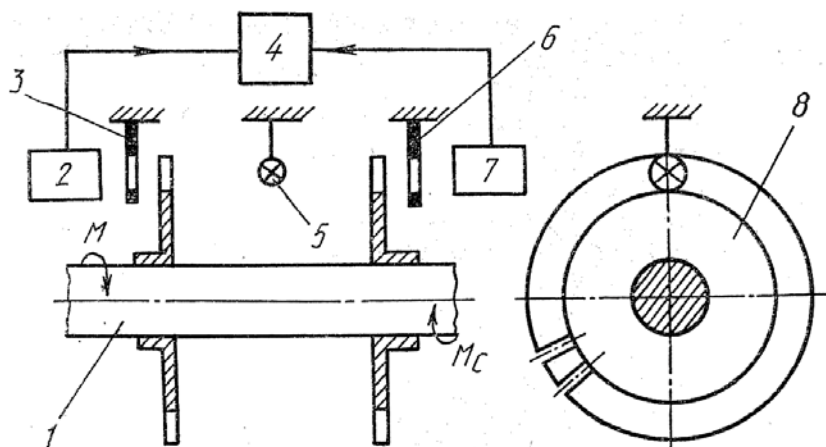


Рис. 2.63. Схема фотоэлектрического измерительного преобразователя крутящего момента

2.5.3. Измерение мощности

Наиболее часто используются измерительные преобразователи мощности, основанные на эффекте Холла (рис. 2.64).

Эффект Холла – явление возникновения поперечной разности потенциалов (называемой также Холловским напряжением) при помещении проводника с постоянным током в магнитное поле.

Пластина преобразователя 1 помещается в зазор ферромагнит-

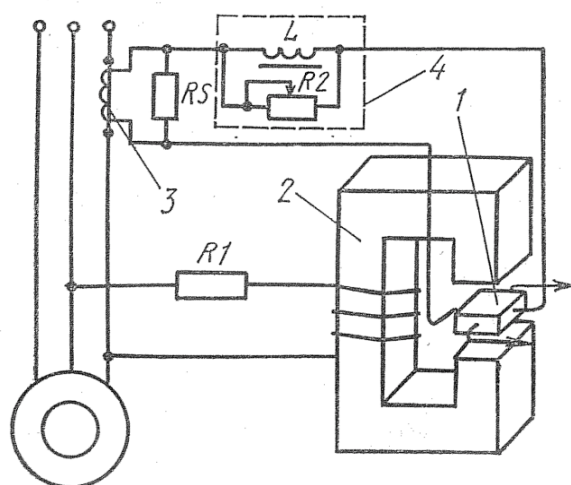


Рис. 2.64. Схема измерительного преобразователя мощности

ного сердечника 2. Одна пара электродов включена на напряжение, снимаемое с трансформатора тока 3, и поэтому через элемент Холла протекает ток, пропорциональный току статора двигателя. При этом напряжение, снимаемое со второй пары электродов, пропорционально мощности. Блок 4 обеспечивает регулировку фазовых отношений в цепи преобразователя.

2.6. Методы и средства измерения температуры

Механические термометры основаны на явлении теплового расширения тел. Эти тела могут быть твердыми, жидкими или газообразными. Механические термометры отличаются надежностью, точностью, низкой стоимостью и простотой обслуживания. Считывание показаний с них, как правило, осуществляется на месте измерения.

В машиностроении применяют биметаллические, жидкостные и газовые термометры.

В **биметаллических термометрах** (рис. 2.65) чувствительный элемент изготавливается из пластины, состоящей из двух или более слоев разнородных металлов, сваренных между собой по всей плоскости соприкосновения.

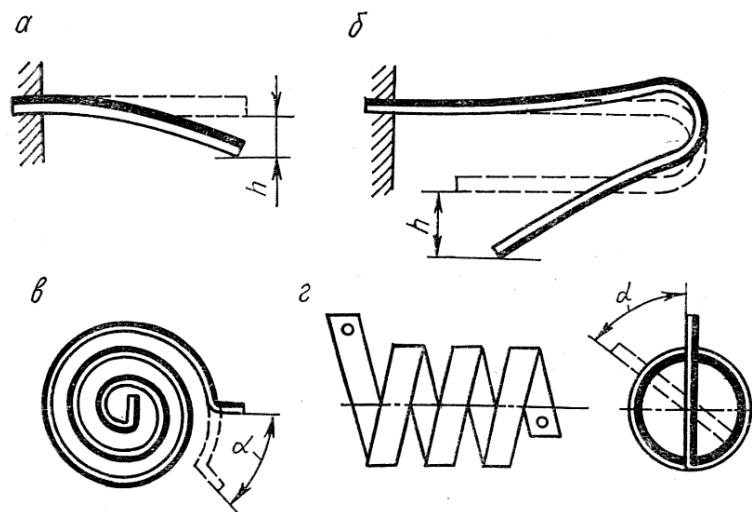


Рис. 2.65. Биметаллические измерительные преобразователи температуры

Пластина может быть предварительно деформирована. При нагреве биметаллической пластины из-за различия коэффициентов линейного расширения ее слоев возникает деформация изгиба, пропорциональная изменению температуры.

Варианты а и б используются в качестве реле температуры, в и г — для непосредственного отсчета показаний термометров. Для этого один конец чувствительного элемента закрепляется, а второй соединяется с передаточным или непосредственно с показывающим устройством. Диапазон измерения биметаллических термометров лежит в интервале от -50 до 600°C . Погрешность измерения — от ± 1 до $\pm 3\%$.

В **жидкостных термометрах** измеряемой величиной, характеризующей температуру, является изменение объема термометрической жидкости. Термобаллон, в котором находится основная часть жидкости, изготавливается из стекла или стали. К термобаллону подключен капилляр диаметром 0,1... 0,2 мм. В качестве жидкости используется этиловый спирт, ртуть и толуол. Погрешность измерений от $\pm 2\%$ до $\pm 0,5\%$.

Основными недостатками механических термометров являются значительная инерционность и сложность объединения с другими информационными сигналами для дальнейшей обработки.

Электрические контактные термометры подразделяются на две группы:

- термометры сопротивления;
- термоэлектрические термометры (термопары).

В **термометрах сопротивления** (рис.2.66) при изменении температуры изменяется активное сопротивление чувствительного элемента. У металлических проводников сопротивление обычно возрастает с повышением температуры, а у полупроводниковых — падает.

Чаще всего применяются платиновые или медные термометры сопротивления. Область применения технических платиновых термометров 260... 1100 °С. Медные термометры могут работать в интервале температур от 50 до 200 °С. Погрешность металлических термометров сопротивления в зависимости от исполнения составляет от $\pm 0,5\%$ до $\pm 3\%$

Полупроводниковые термометры сопротивления выпускаются для измерения температуры в диапазоне от 200 до 300 °С.

Погрешность полупроводниковых термометров сопротивления 0,5%. За счет специального отбора и индивидуальной градуировки можно снизить погрешность полупроводниковых термометров сопротивления до $\pm 0,01^\circ\text{C}$.

Три плеча моста составляют манганиновые резисторы R_1 , R_2 и R_3 . Четвертое плечо состоит из преобразователя термометра R_K и подгоночных резисторов (на схеме не показаны). Последовательное соединение каждого из подводящих проводов соответственно с резисторами R_1 и R_3 позволяет автоматически компенсировать влияние колебаний их температуры на результат измерения. Показания логометра, рамки которого 1 и 2 подключены к двум точ-

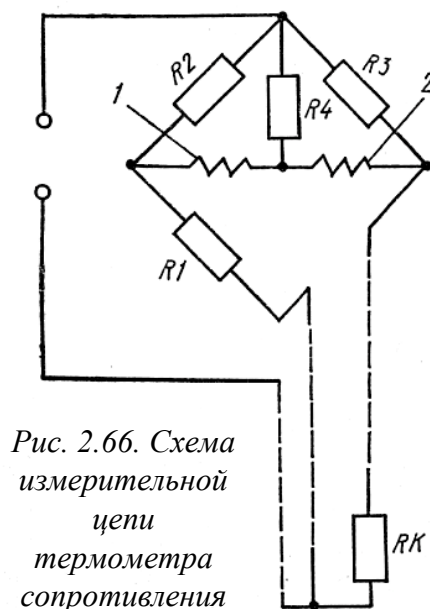


Рис. 2.66. Схема измерительной цепи термометра сопротивления

кам моста непосредственно и к одной через резистор R4, пропорциональны изменению сопротивления преобразователя температуры RK.

Принцип действия **термоэлектрического термометра (термопары)** основан на термоэлектрическом явлении, в результате которого в цепи, состоящей из двух разнородных проводников, возникает термо-э.д.с, зависящая от температуры в местах соединений этих проводников. Для измерения температуры одно из соединений разнородных проводников (рабочие концы) помещают в среду, температуру которой измеряют, а температура другого соединения (свободных концов) известна. Свободные концы термоэлектрического термометра нужно располагать в месте, удобном для стабилизации или измерения температуры.

Зависимость между термо-э.д.с. и разностью температур рабочих и свободных концов в общем случае является нелинейной и может быть аппроксимирована уравнением третьей степени. Если сузить диапазон измеряемых температур, то характеристики многих термопар могут быть линеаризованы (рис. 2.67) без большого ущерба для точности измерений.

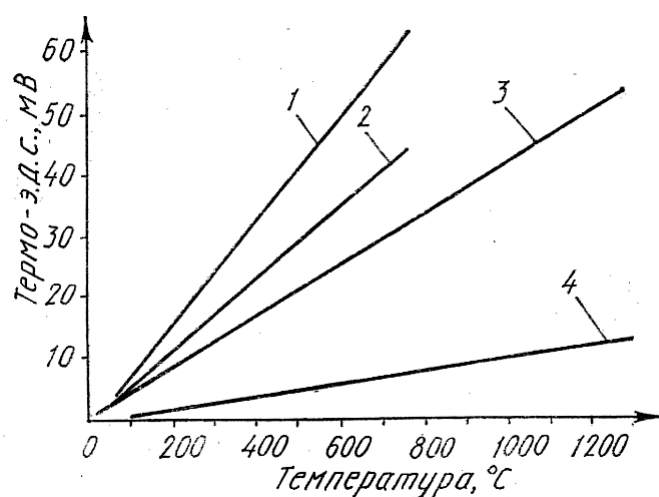


Рис. 2.67. Характеристика наиболее употребительных термоэлектрических преобразователей:
1 – хомель – копель;
2 – железо – константан;
3 – хромель – алюмель;
4 – платинородий – платина

Таблица 2.2

Характеристики термоэлектрических преобразователей

Тип преобразователя	Материал термоэлектродов	Термоэлектроды		Диапазон измеряемых температур (длительно), °C	Предел кратковременного применения, °C
		положительные	отрицательные		
ТИП	Платинородий – платина	10% НИ; 90% Р	100% Р1	0...1300	1600
ТХА	Хромель - алюмель	хромель	аллюмель	(-50)...1000	1300
ТХК	Хромель – копель	хромель	копель	(-50)...600	800

Все нестандартные средства измерения температур требуют индивидуальной градуировки. Примером является измерение температуры в зоне резания **естественной термопарой** (рис. 2.68-2.69).

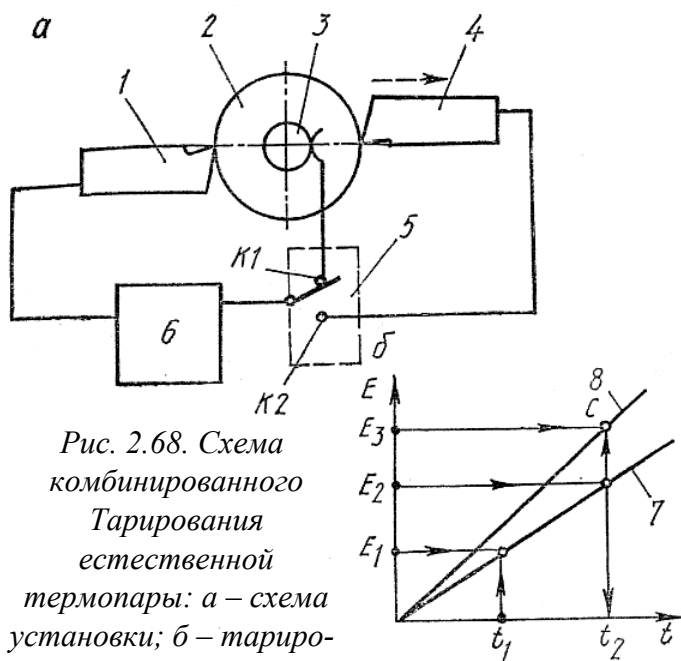


Рис. 2.68. Схема комбинированного Тарирования естественной термопары: а – схема установки; б – тарировочный график

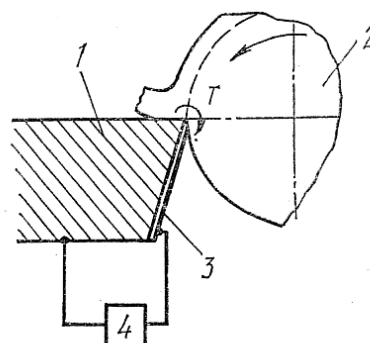


Рис. 2.69. Схема однорезцовой естественной термопары

Полуискусственная термопара (рис. 2.70) может быть получена и при установке одного из проводников в шлифовальный инструмент.

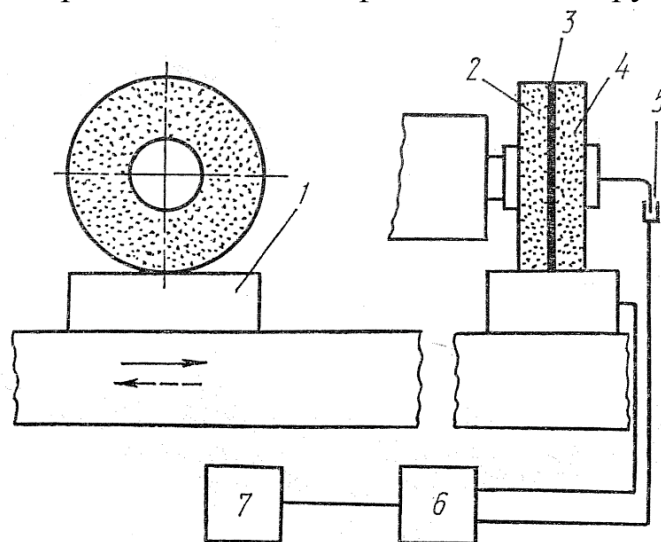


Рис. 2.70. Схема полуискусственной термопары

Между двумя плотно притертыми друг к другу половинками шлифовального круга 4 и 2 укладывается фольга 3 толщиной 0,01...0,05 мм, которая образует с деталью 1 полуискусственную термопару с тонким спаем, равным по длине ширине зоны шлифования (1,5...3 мм). Сигнал термопары, соответ-

ствующий средней температуре зоны контакта, через ртутный токосъемник 5 попадает в усилитель 6 и затем в регистрирующий прибор 7. Преимуществом такой термопары является непрерывность и устойчивость сигнала.

Бесконтактные методы измерения температуры основаны на том, что поверхность всякого нагретого тела испускает электромагнитное излучение. Приборы, которые могут по тепловому излучению определять температуру излучателя, называются пирометрами. При помощи оптики излучение нагретого тела фокусируется и направляется на приемник.

Различают следующие виды приемников теплового излучения: фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы.

Пирометрические оптические устройства (рис. 2.71) создают изображение излучающей поверхности (или ее участка) на приемнике и тем самым делают измерение потока излучения в широком диапазоне независимым от расстояния до изучаемого объекта.

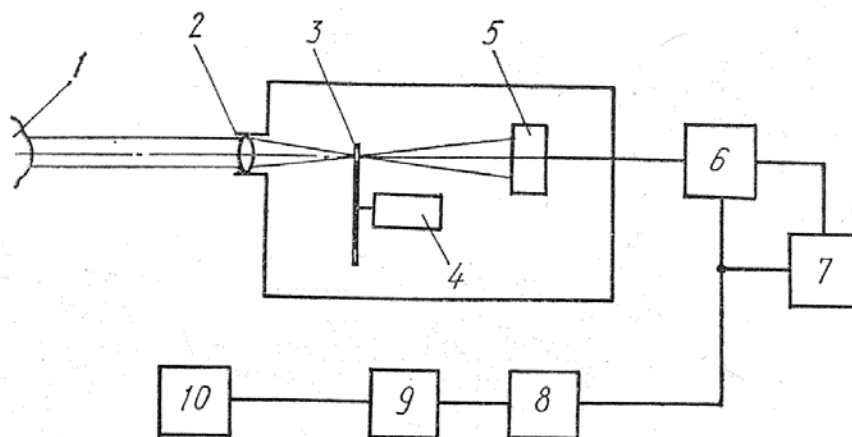


Рис. 2.71. Схема фотоэлектрического цветowego пирометра

Излучение от объекта исследования 1 линзой 2 фокусируется на обтюраторе 3, который вращается синхронным электродвигателем 4 и затем воспринимается фотоэлементом 5. На диске обтюратора имеется ряд отверстий, половина которых закрыта красным светофильтром, а половина — синим. Таким образом, на фотоэлемент поочередно попадают то красные, то синие лучи. Кроме того, благодаря отверстиям фототок оказывается промодулированным с несущей частотой, определяемой числом отверстий в обтюраторе и частотой вращения последнего. Модулированный ток в нагрузке фотоэлемента через усилитель 6, который снабжен устройством 7 для автоматической регулировки чувствительности, поступает в фазочувствительный выпрямитель 8. После этого с помощью коммутатора 9 сигнал разделяется соответственно отношению интенсивностей красных и синих лучей и воспринимается измерителем отношения 10.

Фотоэлектрические цветковые пирометры могут обеспечить измерение температуры с погрешностью, не превышающей 1%.

Инфракрасные пирометры (рис. 2.71) позволяют измерять температуру в диапазоне от -50°C до $+3000^{\circ}\text{C}$ на больших расстояниях и применяются во всех отраслях промышленности.

Основные области применения:

- производственные процессы;
- техническое обслуживание и диагностика;
- безопасность и защита;
- производство сталей и сплавов;
- целлюлозно-бумажная промышленность;
- производство пластмасс, стекла;
- пищевая промышленность;
- энергетика;
- неисправности электрических цепей;
- диагностика двигателей, редукторов, подшипников;
- диагностика систем зажигания и охлаждения;
- местонахождение возпламенений;
- контроль опасных материалов;
- поисково-спасательные работы.



Рис. 2.71. Портативные инфракрасные пирометры

Инфракрасные пирометры используются для диагностики производственного оборудования (рис. 2.72-2.78).



Рис. 2.72. Поиск неисправности обмотки и контактных соединений



Рис. 2.73. Проверка движущихся деталей на предмет износа и смазки



Рис.2.74. Оценка степени износа подшипников до их полного повреждения



Рис. 2.75. Диагностика двигателя автомобиля

Волоконно-оптические пирометры специально предназначены для проведения измерений в неблагоприятных условиях вторичной зоны охлаждения.



Рис. 2.76. Внешний вид волоконно-оптических пирометров

Армированная оплетка с воздушным охлаждением защищает волоконно-оптический кабель от загрязнения и перегрева. Объектив, размещенный в

корпусе из нержавеющей стали, можно приблизить к заготовке на расстояние до нескольких сантиметров.

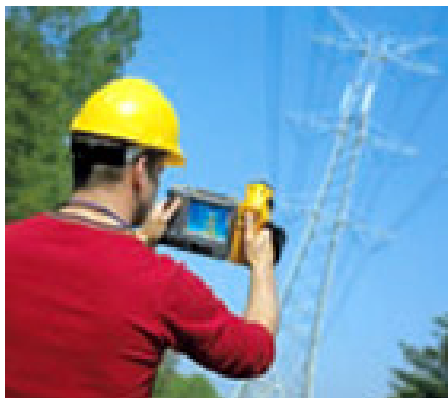


Рис. 2.77. Контроль высоковольтной линии с помощью тепловизора



Рис. 2.78. Обнаружительные тепловизоры (охрана)

Цветовые индикаторы температуры (термоиндикаторы) – это вещества, изменяющие свой цвет в зависимости от температуры. По принципу действия термоиндикаторы подразделяются на четыре основных типа: термохимические, плавления, жидкокристаллические, люминесцентные.

Термохимические индикаторы — сложные вещества, которые при достижении определенной температуры резко изменяют свой цвет за счет химического взаимодействия компонентов. Они обеспечивают точность измерения температуры в пределах от 5 до 10 °С.

Термоиндикаторы плавления изменяют цвет в результате плавления одного или нескольких их компонентов, имеющих строго определенную температуру плавления. Погрешность измерения температуры этими индикаторами составляет 0,5... 1,5, реже 2,5%.

Жидкокристаллические термоиндикаторы — вещества, которые в определенном интервале температур переходят в жидкокристаллическое состояние, обладающие свойством при незначительном изменении температуры так изменять свою структуру, что падающий на них луч света разлагается и отражается с изменением цвета.

Люминесцентные термоиндикаторы в зависимости от температуры изменяют либо яркость, либо цвет, либо цветовой тон излучения.

Погрешность измерения температуры термоиндикаторами двух последних типов составляет 0,1...0,5%.

По способности к физико-химическим превращениям термоиндикаторы делятся на три группы:

- обратимые;
- необратимые;
- квазиобратимые.

К обратимым относятся термоиндикаторы, которые, изменяя цвет после нагревания, восстанавливают первоначальный цвет при понижении температуры ниже критической. Такие термоиндикаторы можно использовать многократно.

Необратимые индикаторы указанным свойством не обладают, и их первоначальный цвет после охлаждения не восстанавливается. Квазиобратимые термоиндикаторы восстанавливают первоначальный цвет при понижении температуры постепенно, под воздействием влаги, имеющейся в воздухе. Их также можно использовать многократно.

Термоиндикаторы плавления являются только необратимыми, а жидкокристаллические и люминесцентные – обратимыми. Термохимические индикаторы могут быть обратимыми, необратимыми и квазиобратимыми.

Термоиндикаторы наносятся на поверхность объекта исследования в виде тонкой пленки.

2.7. Методы и средства механических испытаний

Обеспечивают следующие виды испытаний:

- статическим нагружением;
- ударной нагрузкой;
- циклической нагрузкой;
- твердости;
- на износостойкость.

2.7.1. Испытания статическим нагружением

При статических испытаниях для определения характеристик прочности и пластичности исследуемый образец подвергается действию постоянной (или медленно и плавно увеличивающейся) нагрузки. Измеряются нагрузка и деформация образца.

Наиболее распространенным является испытание на растяжение. Гладкий ненадрезанный образец растягивают в испытательной машине в направлении его оси до разрыва, а зависимость между растягивающей силой и изме-

нением длины образца регистрируют в виде диаграммы «нагрузка – абсолютное удлинение». Если нагрузку отнести к исходной площади поперечного сечения образца, а удлинение – к начальной расчетной длине, то получается диаграмма растяжения стали «напряжение – относительное удлинение».

На начальной стадии испытания относительное удлинение пропорционально напряжению (до точки α). Этот участок диаграммы позволяет определить **модуль упругости**. Точно определить этот параметр практически невозможно, поэтому техническим условным пределом упругости называют напряжение, при котором относительная остаточная деформация составляет 0,01%. При дальнейшем повышении нагрузки отмечается рост пластической деформации и можно выделить так называемую **площадку текучести**, когда деформация увеличивается при постоянном напряжении, которое называют **пределом текучести**. Для материалов без четко выраженной площадки текучести определяют условный предел текучести, который соответствует относительной остаточной деформации 0,2%. При напряжениях, превышающих предел текучести, зависимость между деформациями и напряжениями нелинейна. Когда способность к деформированию образца исчерпана, наступает разрушение. Максимальное условное напряжение – отношение максимальной растягивающей силы к начальной площади поперечного сечения образца – называют временным сопротивлением.

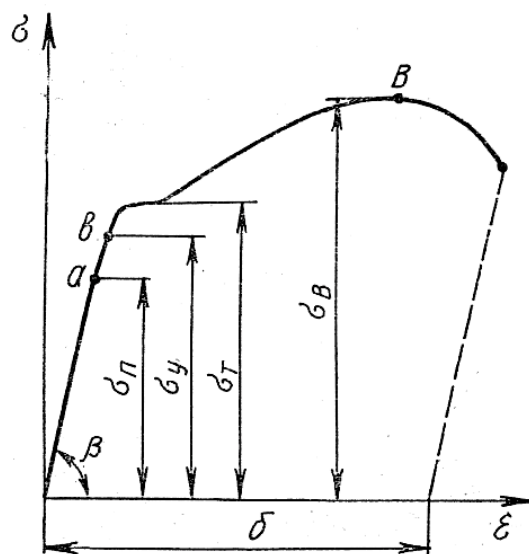


Рис. 2.79. Диаграмма растяжения стали

Испытания на сжатие, изгиб, кручение проводят аналогичным образом.

Для оценки поведения материала при повышенных температурах проводят **испытания на длительную прочность** – до тех пор, пока при данной температуре и нагрузке не будет достигнута максимальная остаточная деформация или произойдет разрушение образца. При этих испытаниях определяют предел длительной прочности и предел ползучести.

Пределом длительной прочности называют максимальное (условное) напряжение, которое может выдержать образец без разрушения при данной температуре в течение неограниченно долгого времени.

Предел ползучести при определенной температуре – максимальное (условное) напряжение, при котором скорость ползучести за определенное время испытания (25...35 ч) не превосходит 0,0001%/ч. При этом относительное остаточное удлинение не должно превышать 0,2% после 45 ч испытания

под нагрузкой. Пределы прочности и ползучести определяют для сталей в интервале температур 350...700 °С.

2.7.2. Испытания ударной нагрузкой

Стандартный образец, установленный на опоры копра, разрушается за один удар тяжелого маятника по стороне, противоположной надрезу. Скорость маятникового копра в момент соударения зависит от угла падения и обычно составляет 5...7 м/с.

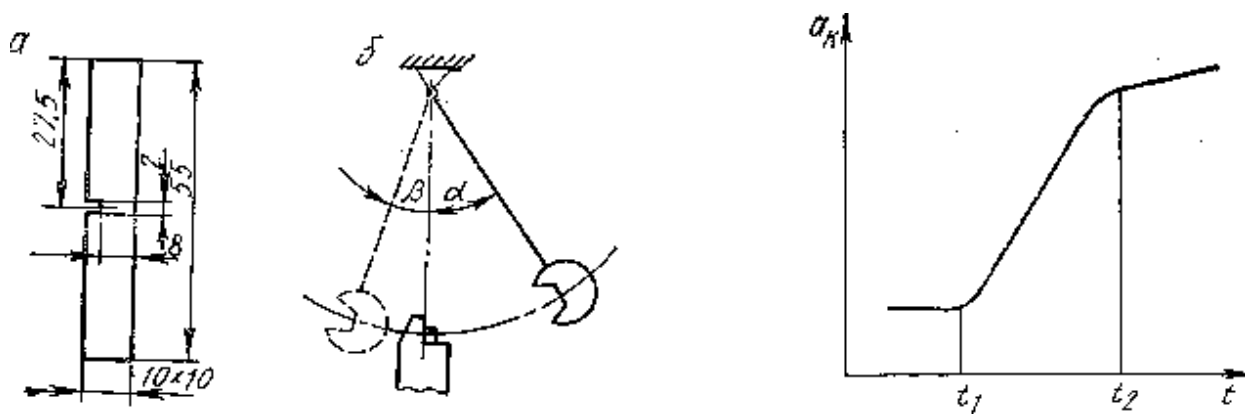


Рис. 2.80

Количественной характеристикой вязкости при ударном разрушении является отношение работы, необходимой для разрушения образца, к площади его поперечного сечения в плоскости симметрии надреза. Этот параметр округляют до целого числа и называют **ударной вязкостью**.

Зависимость ударной вязкости стали от температуры показана на рис.2.80. При температурах, меньших t_1 , происходит хрупкий излом, больших t_2 – вязкий. Если $t_1 < t < t_2$, то наблюдается смешанный излом. Значение t_1 - t_2 зависит от структуры стали, вида ее термической обработки, предварительной холодной пластической деформации образца и его старения.

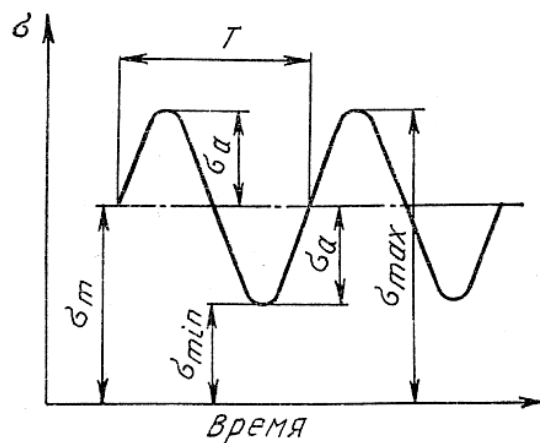
Кроме испытания ударом на изгиб (но значительно реже), применяют **испытание ударом на растяжение и скручивание**.

2.7.3. Испытания циклической нагрузкой

При циклических нагрузках в исследуемом образце происходит постепенное накопление повреждений, приводящих к изменению свойств, образованию трещин, их развитию и разрушению. Этот процесс называют усталостью. Параметрами циклического нагружения являются: среднее напряжение цикла, амплитуда напряжения, частота циклов (или период цикла), коэффициент асимметрии. Цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения равны, но противоположны по знаку, называется **симметричным**. Схема

нагрузки (рис. 2.81) должна в той или иной мере воспроизвести в образцах напряженное состояние, характерное для эксплуатационных условий работы детали.

Рис. 2.81. Схема измерения нагрузки на образец при испытании на усталость



2.7.4. Измерение твердости

Методы измерения твердости основаны на том, что в испытуемый материал вдавливают индентор, а пластическую деформацию при этом рассматривают как меру твердости. Наиболее распространенными инденторами являются: закаленный шарик, алмазный конус и четырехгранная алмазная пирамида с углом при вершине 136° .

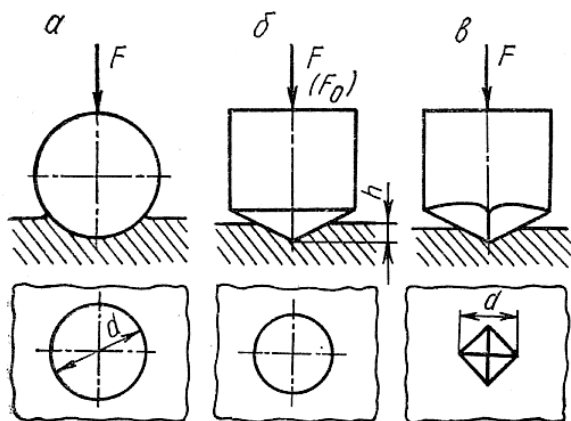


Рис. 2.82. Инденторы, применяемые при измерении твердости:
а — шарик; б — конус; в — пирамида

При определении твердости по Бринеллю шарик в течение установленного времени вдавливается с определенной силой в испытуемый образец. В результате на его поверхности образуется отпечаток. Число твердости НВ рассчитывают как отношение приложенной нагрузки к площади отпечатка. Для определения последней при помощи специальной лупы замеряется

диаметр отпечатка. Твердость по Виккерсу НВ определяют аналогично. Различие заключается лишь в форме индентора (пирамида).

Определение твердости по методу Роквелла является самым распространенным видом технологического контроля металлических деталей (индентор — конус). По сравнению с методом Бринелля у него следующие преимущества: простота определения числа твердости путем отсчета по шкале индикатора без вычисления или пользования таблицами, малая повреждаемость поверхности, высокая производительность при измерениях.

Для определения твердости относительно мягких материалов по Роквеллу вместо алмазного конуса используется стальной закаленный шарик диаметром 1,588 мм.

Принцип работы портативных твердомеров (рис. 2.83) серий ТН-130, ТН-132, ТН134, НЛН-11А, ТН-140, ТН-160 основан на отскоке шарика.



Рис. 2.83. Твёрдомер

Точность измерений до 0,8%. Измерение в шкалах HL, HRC, HRB, HB, HV, HSD и др.

2.7.5. Испытания на износостойкость

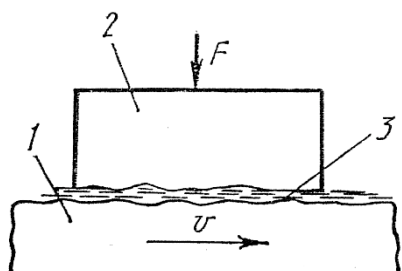


Рис. 2.84. Схема испытания на износостойкость

Целью является изучение поведения контактных поверхностей двух деталей 1 и 2, находящихся в относительном движении и прижатых друг к другу с определенной силой. Между этими деталями обычно находится промежуточный слой 3 вещества, которое может замедлить или ускорить изнашивание.

Различают: абразивный, адгезионный и диффузионный износ. Испытания можно проводить на модели либо в реальных условиях. Испытания на модели (обычно ускоренные) проводят в более жестких, чем на практике, условиях. Такие испытания проводятся на различных лабораторных установках (рис. 2.85).

Испытуемый образец 1 с заданной силой F прижимается к периферии ролика 2 или торцу диска 3. Приведенные схемы испытаний обеспечивают разный коэффициент взаимного перекрытия (отношение площадей трения контактирующей пары): от близкого к нулю (рис. 7.8., а) до 1 (рис. 7.8., д).

Для оценки износостойкости пары трения необходимо:

- обеспечить коэффициент взаимного перекрытия, который имеет место при эксплуатации;
- обеспечить скорость скольжения, максимально приближающуюся к эксплуатационной;
- подобрать такую нагрузку, при которой контактная температура будет соответствовать эксплуатационной;
- определить фактическую площадь касания;
- вычислить удельный износ.

Удельный износ будет совпадать с эксплуатационным при одинаковых параметрах шероховатости поверхностей в реальном узле и у испытуемых образцов.

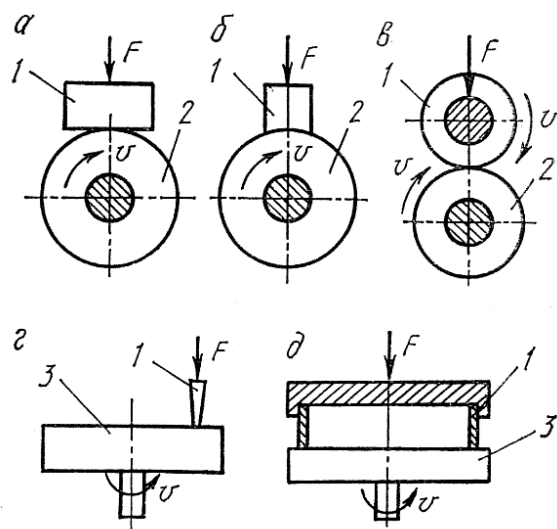


Рис. 2.85. Схемы испытаний на износостойкость методом моделирования

Различают следующие методы измерения износа:

- измерение линейного износа: измеряют размеры элементов пары трения до и после испытания. Для измерения используют контактные или бесконтактные методы и средства измерений.
- весовой метод: образцы взвешиваются до и после испытания. Однако этот метод не дает возможности определить закон распределения износа по поверхности.
- путем химического анализа смазочного материала. Этот метод обладает высокой точностью, но не дает возможности оценить износ каждой из трущихся деталей.
- путем облучения материала испытуемой детали радиоактивными изотопами. По мере изнашивания в слой смазочного материала будет попадать пропорциональное износу количество атомов этого изотопа. По интенсивности излучения изотопа в пробе масла можно судить об объемном износе за определенное время.

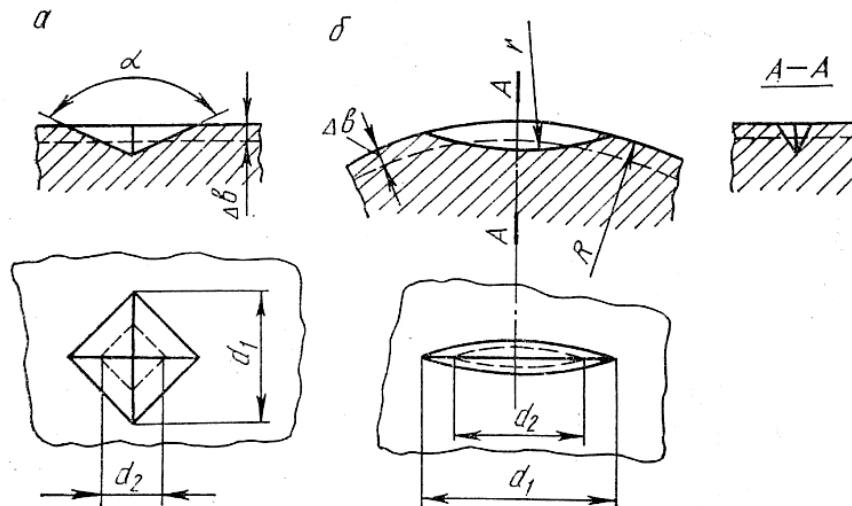


Рис. 2.86. Схемы искусственных баз для измерения износа

Для измерения износа элементов пар трения широко используется метод искусственных баз. В основе этого метода лежит косвенное определение износа по изменению размеров суживающегося углубления заранее известного профиля. Такое углубление получают вдавливанием конического или пирамидального индентора, вырезанием остроугольной лунки вращающимся резцом или шлифовальным кругом. Линейный износ определяется по формулам.

2.8. Определение механических свойств и структуры конструкционных материалов

Неразрушающие методы определения механических свойств и структуры конструкционных материалов основаны на корреляционной зависимости между структурой и механическими свойствами материалов, с одной стороны,

и их магнитными и акустическими характеристиками, с другой. Например, существует связь между твердостью углеродистых и низколегированных сталей и их коэрцитивной силой (рис. 2.87): чем больше содержание углерода в сплаве, тем выше коэрцитивная сила, которая измеряется коэрцитиметром.

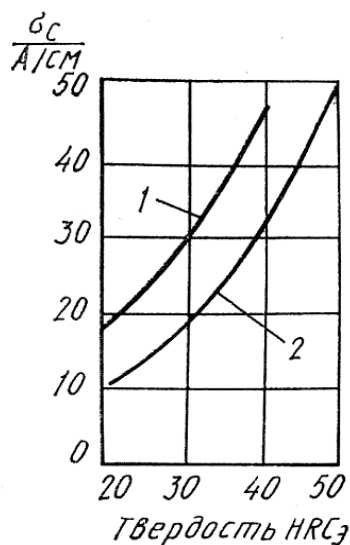


Рис. 2.87. Зависимость между коэрцитивной силой и твёрдостью:

1 – сталь 30XB;

2 – сталь 20X17H2

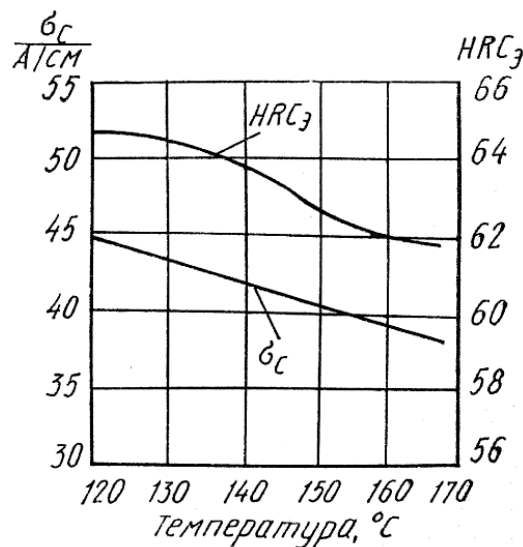


Рис. 2.88. Зависимость коэрцитивной силы и твёрдости от температуры отпуски стали 30XB

Электромагнитный метод (метод вихревых токов) основан на регистрации изменений электромагнитного поля вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Экспериментально установлено, что удельная электрическая проницаемость стали тем меньше, чем выше в ней содержание углерода и чем больше углерода при закалке перейдет в твердый раствор. Выявлена связь между удельной проводимостью алюминиевых сплавов и их свойствами после термической обработки. Из-

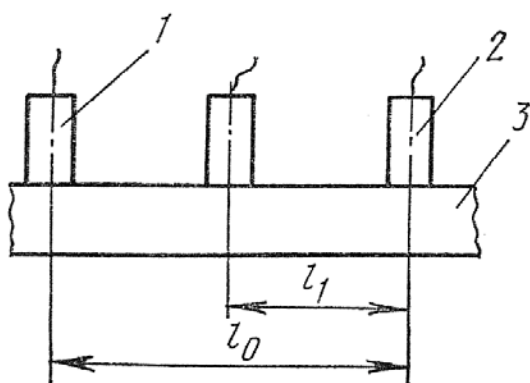


Рис. 2.89. Схема измерения механических свойств материалов акустическим методом

мерения электрической проницаемости осуществляется электромагнитными структурокопами.

Акустические методы контроля физико-механических свойств материалов (рис. 2.89) основаны на связи размеров зерна, модулей упругости, твердости, текстуры, прочности материалов и скорости распространения и коэффициента затухания звуковых волн в испытуемом материале.

Излучающий 2 и приемный 1 искатели устанавливают на очищенную и

смазанную маслом поверхность изделия. Расстояние между излучателями обычно составляет 200 мм. Скорость распространения звука определяют по времени его прохождения в материале. Для измерения коэффициента затухания один из излучателей устанавливают на расстоянии $L_1 = L_0/2$. По изменению амплитуды сигнала находят значение коэффициента затухания.

Для измерения твердости абразивного инструмента используют корреляционную связь ее со скоростью распространения ультразвуковых волн в материале, которую определяют резонансным методом.

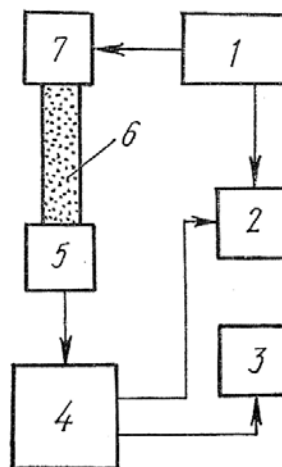


Рис. 2.90. Блок-схема прибора «Звук-1М»

2.9. Определения остаточных напряжений

Остаточные макронапряжения возникают в результате действия различных технологических факторов при изготовлении детали (изделия). Значение и знак остаточных макронапряжений зависят от схемы деформирования объекта и температуры, при которой оно происходило. При обработке резанием или шлифованием остаточные макронапряжения являются следствием неравномерности распределения температуры и деформаций в поверхностных слоях обрабатываемой детали и во времени. Значительные макронапряжения возникают при термической обработке (закалке), при сварке и резке. В этих случаях остаточные макронапряжения обусловлены в основном неравномерностью температурного поля при быстром нагреве или охлаждении.

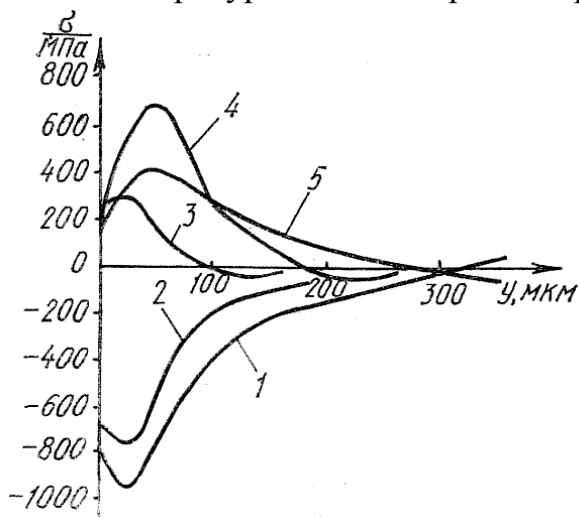


Рис. 2.91. Эпюры распределения макронапряжений по глубине у поверхностного слоя деталей после обработки их различными методами

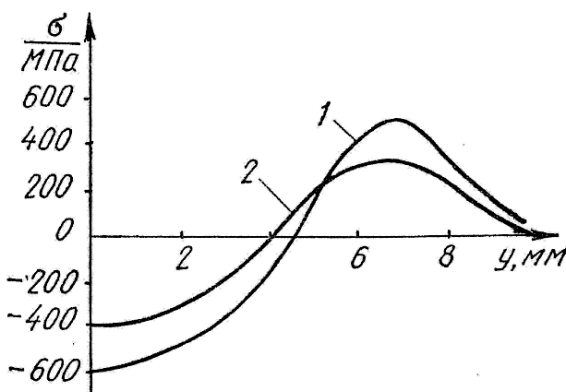
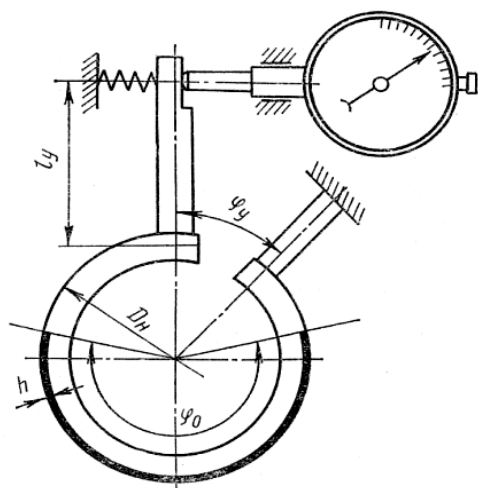


Рис. 2.92. Эпюры макронапряжений после закалки

Основными методами определения остаточных напряжений являются механические, рентгеновские и электрофизические методы.

Механические методы основаны на предположении, что разрезка или удаление части детали с остаточными напряжениями эквивалентны приложению к оставшейся детали на вновь появившихся поверхностях напряжений, равных остаточным, но с обратным знаком.

Они вызывают деформирование детали или появление усилия в устройствах, препятствующих деформации. Измеряя возникшие деформации или силы, можно вычислить остаточные напряжения.



Наиболее широкое применение для вырезки образцов нашли электроэрозионные методы. Наиболее распространенными методами удаления напряженных слоев металла при исследовании остаточных напряжений являются электролитическое и химическое травления.

Рис. 2.93. Метрологическая схема определения макронапряжений в кольцевом образце

3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

3.1. Виды погрешностей измерений

Погрешности измерений:

- классификации;
- методические;
- алгоритмические;
- аппаратные (инструментальные);
- внешние.

Погрешность классификации обусловлена несоответствием реально-го (исследуемого) объекта или процесса приписанной ему модели. Например, измеряя диаметр детали, предполагаем, что она представляет собой идеальный цилиндр. Такая идеализация неизбежна при несоответствии между параметром модели (в данном случае диаметр) и реальным свойством объекта (поверхность реальной детали имеет отклонения от цилиндричности как в поперечном, так и в продольном сечении). Это несоответствие называют пороговым. Чтобы измерение было возможным, погрешность, обусловленная пороговым несоответствием, должна быть меньше полной погрешности измерения.

Погрешность метода возникает вследствие недостаточной разработанности теории тех явлений, которые положены в основу измерения, и тех соотношений, которые используются для оценки измеряемой величины.

Алгоритмическая погрешность зависит от степени соответствия алгоритма измерения математическому определению измеряемой характеристики (чаще всего это относится к измерению параметров случайных процессов).

Аппаратурная погрешность обусловлена несовершенством средств измерений, их схемного решения, недостаточной точностью реализации принятого алгоритма измерений.

Внешние погрешности возникают при действии различных факторов, внешних по отношению к средству измерения. К ним часто относят ошибки экспериментатора при настройке средства измерения и при снятии показаний.

Различают систематические и случайные погрешности.

Систематическая погрешность – составляющая погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

Обнаруженная и оцененная систематическая погрешность исключается из результата измерения путем введения поправки. Однако полностью устранить таким образом систематическую погрешность невозможно.

Случайная погрешность – индивидуально непредсказуемая составляющая погрешности измерения, характеристики и закономерности изменения которой проявляются лишь на значительном числе результатов измерения.

Качество измерений, отражающее близость к нулю систематической погрешности результатов измерений, называют правильностью измерений.

Качество измерений, отражающее близость результатов измерений, выполненных в одних и тех же условиях, называется сходимостью. Хорошая сходимость измерения свидетельствует о малости случайных погрешностей.

Качество измерений, отражающее близость результатов измерений, выполняемых в различных условиях (в различное время, в различных местах, различными средствами), называют воспроизводимостью измерений.

Возможны также грубые погрешности и промахи.

Грубая погрешность – погрешность, существенно превышающая уровень, оправданный условиями измерения, свойствами применяемых средств измерений и квалификацией экспериментатора. Такие погрешности могут возникать, например, вследствие резкого кратковременного изменения напряжения в сети питания. Грубые погрешности измерения обнаруживают статистическими методами и исключают из рассмотрения.

Промахи – следствие неправильных действий экспериментатора, например, описка при записи результатов наблюдений, неправильно снятые показания прибора и т.д. Промахи обнаруживаются нестатистическими методами, и их следует всегда исключать из рассмотрения.

Различают погрешности:

- абсолютные;
- относительные;
- приведенные.

Абсолютная погрешность – это разность результата измерения величины X и ее истинного значения $X_{и}$, выраженных в одинаковых единицах:

$$\Delta X = X - X_{и}$$

Однако, поскольку истинное значение измеряемой величины остается неизвестным, на практике можно дать лишь приближенную оценку погрешности измерения.

Относительная погрешность – отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = (\Delta X / X_{и}) 100$$

Приведенная погрешность относится не к конкретному значению измеряемой величины, а к максимально возможному в данном исследовании или к максимальному значению шкалы прибора:

$$\delta_{пр} = (\Delta X / X_{\max}) 100$$

Относительная и приведенная погрешности обычно выражаются в процентах.

3.2. Характеристики средств измерений

Различают метрологические и эксплуатационные характеристики средств измерения (СИ) и (или) измерительных преобразователей (ИП).

Метрологические характеристики определяют результаты и погрешности измерений.

Эксплуатационные характеристики определяют условия применения СИ и ИП.

Метрологические характеристики:

- порог чувствительности;
- разрешающая способность;
- вариация показаний;
- функция преобразования;
- характеристики погрешности СИ и ИП.

Эксплуатационные характеристики:

- предел измерений (преобразования);
- полный диапазон измерений (преобразования) (интервал значений измеряемой (преобразуемой) величины от порога чувствительности до верхнего предела измерений);
- рабочий диапазон измерений и частот.

Порогом чувствительности СИ (ИП) называют значение измеряемой (преобразуемой) величины, для которой относительная погрешность составляет 100%.

Понятие **разрешающей способности** употребляется в разных значениях.

Если измеряемая величина медленно и непрерывно изменяется от любого, отличного от нуля значения, то под разрешающей способностью понимают изменение входной величины, необходимое для начала изменения показаний. Если показания изменяются дискретно, то разрешающей способностью называют шаг изменения показаний. Это определение совпадает с понятием разрешающей способности цифровых показывающих приборов.

Вариацией показаний называется разность показаний, получаемая при одном и том же значении измеряемой величины при медленном непрерывном или шаговом подходе к метке шкалы один раз с меньшего, а другой раз с большего значения. Причины вариации показаний могут быть различными: люфт в механических передающих элементах, сухое трение, гистерезисные явления в механических и электромагнитных системах.

Функция преобразования — функциональная зависимость между сигналом на входе X и сигналом на выходе y , задаваемая аналитическим выражением или графиком.

Если X изменяется медленно или остается в процессе измерения постоянным, то функцию преобразования называют градуировочной характеристикой. Идеальная градуировочная характеристика линейна:

$$y = KX,$$

где K — коэффициент преобразования.

Реальные градуировочные характеристики могут быть нелинейными (рис. 3.1, а) или гистерезисными (рис. 3.1, б).

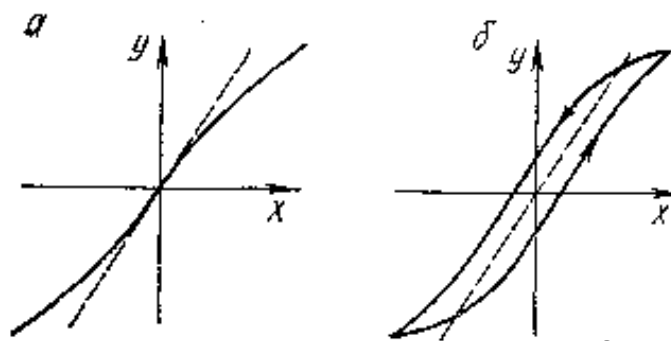


Рис. 3.1. Градуировочные характеристики

Статической чувствительностью $S(x)$ ИП (СИ) называют отношение приращения y к приращению X . Для линейной градуировочной характеристики чувствительность равна коэффициенту преобразования. У некоторых ИП

статическая чувствительность отсутствует (пьезоэлектрические и электродинамические ИП, фильтры и др.).

Если входной сигнал X быстро или периодически изменяется во времени, то функция преобразования СИ (ИП) задается в виде дифференциального уравнения, импульсной характеристики, переходной характеристики, передаточной функции или в виде амплитудно-частотной (АЧХ) и фазово-частотной (ФЧХ) характеристик. При этом СИ (ИП) рассматриваются как линейные стационарные системы непрерывного действия с сосредоточенными параметрами. Свойства линейной системы характеризуются ее реакцией (видом выходного сигнала) на определенный, типовой входной сигнал. Этот выходной сигнал можно определить расчетным путем в результате решения дифференциального уравнения или экспериментально.

Основными типовыми сигналами являются: единичная импульсная функция, единичная функция, линейно нарастающая функция и гармоническая функция (рис. 3.2).

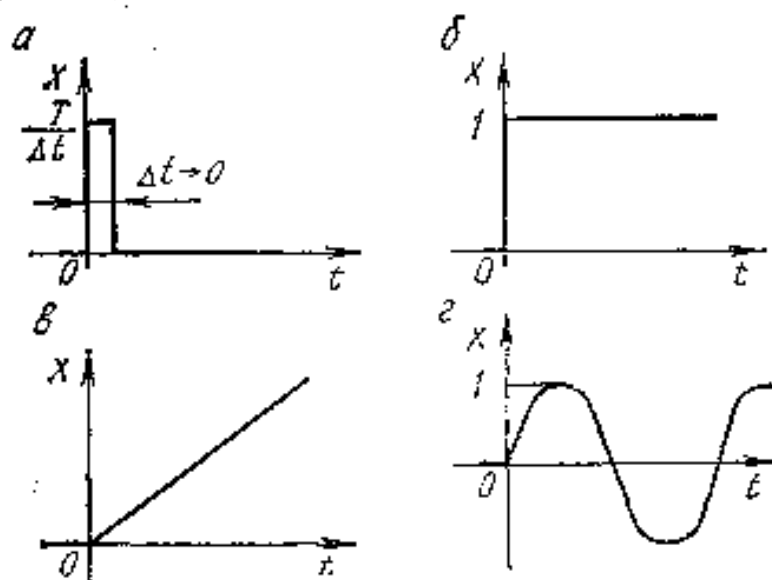


Рис. 3.2. Типовые сигналы: а – единичная импульсная функция; б – единичная функция; в – линейная функция; г – гармоническая функция.

3.3. Погрешности средств измерения

В результате воздействия большого числа различных случайных и детерминированных факторов, возникающих в процессе изготовления, хранения и эксплуатации СИ (ИП), их показания неизбежно отличаются от истинных значений измеряемых величин. Эти отклонения характеризуют погрешности средств измерения.

Абсолютная погрешность равна алгебраической разности показания прибора $X_{п}$ и истинного значения измеряемой величины X :

$$\Delta X = X_{п} - X$$

Однако на практике вместо X приходится пользоваться X_d (действительным значением X), полученным с такой точностью, что указанная замена допустима.

Относительная погрешность:

$$\delta = (\Delta X / X_d) 100$$

Погрешности средств измерений (СИ) принято подразделять на статические, имеющие место при измерении постоянных величин после завершения переходных процессов в элементах прибора, и динамические, появляющиеся при измерении переменных величин и обусловленные инерционными свойствами СИ.

Погрешность средства измерений может иметь и систематическую, и случайную составляющие.

Систематические погрешности вызываются неточностями шкал, изменением во времени упругих свойств пружины, температуры, влажности, напряжения, питания и т. д. При проверке СИ систематические погрешности могут быть определены для каждой точки шкалы и исключены из результатов последующих точных измерений.

Случайные погрешности СИ возникают при случайном изменении параметров составляющих его ИП и случайных погрешностях отсчета. В общем случае их следует рассматривать как случайную функцию времени, измеряемой величины и влияющих величин. Фактически любой ИП имеет несколько входов: основной для измеряемой величины и дополнительные для влияющих величин, которые не должны измеряться, но проявляются в выходном сигнале.

Ввиду разного характера воздействия влияющих величин появляется два вида погрешностей: мультипликативные и аддитивные.

Мультипликативные погрешности возникают вследствие влияния неизмеряемых величин на статическую чувствительность ИП.

Аддитивные погрешности прибавляются к сигналу от измеряемой величины. По механизму воздействия различают аддитивные факторы 1-го и 2-го рода. Аддитивные факторы 1-го рода воздействуют на вход ИП, а 2-го рода — на выходные цепи ИП.

Обобщенной характеристикой СИ, определяемой пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами СИ, влияющими на их точность, является класс точности.

Класс точности СИ определяется по их основной погрешности и способу ее выражения.

3.4. Уменьшение систематических погрешностей средств измерений

Различают постоянные и закономерно изменяющиеся систематические погрешности СИ. Систематические погрешности СИ подразделяются на прогрессирующие, периодические и изменяющиеся по сложному закону.

Одной из главных составляющих систематической погрешности СИ является **кинематическая погрешность**, обусловленная нелинейностью функций преобразования (градуировочных характеристик) его ИП. Такие погрешности характерны для рычажных ИП (рис. 3.3.).

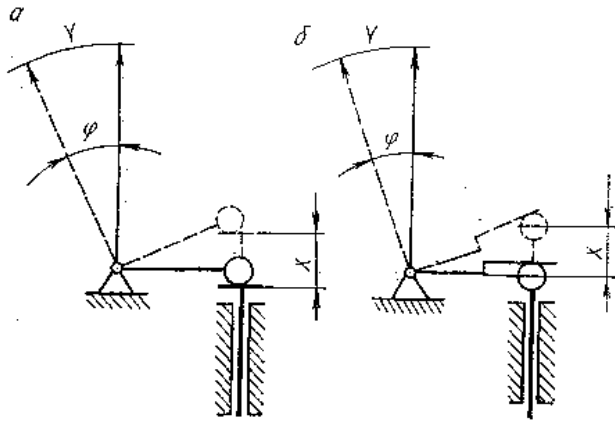


Рис. 3.3. Рычажные измерительные преобразователи: а – синусный; б – тангенсный

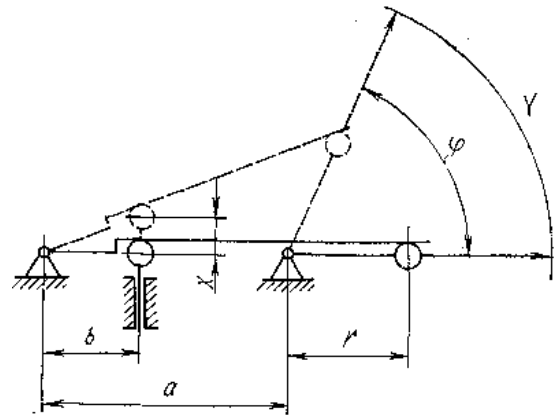


Рис. 3.4. Двухрычажный измерительный преобразователь

Так как отсчет Y прямолинейного перемещения штока производится по дуговой шкале, то появляется относительная кинематическая погрешность преобразователя. Погрешность можно уменьшить, если скорректировать градуировку круговой шкалы.

Малыми кинематическими погрешностями при относительно больших пределах измерения обладают двухрычажные ИП. При $a = 2g$ кинематические погрешности двухрычажного ИП на два порядка меньше, чем у рычажного (рис. 3.4.).

Нелинейностью обладают не только механические, но и пневматические, электрические, электромагнитные и акустические ИП.

Кинематические погрешности, присущие различным ИП, не следует смешивать с технологическими кинематическими погрешностями, связанными с погрешностями их изготовления, сборки и регулировки (погрешность шага и профиля элементов передачи, эксцентриситеты элементов передач и шкал, погрешности градуировки, непрямолинейность направляющих и т.д.).

Существует два способа уменьшения технологических погрешностей:

- путем назначения более жестких допусков на отдельные элементы цепи передачи сигналов;
- посредством введения в конструкцию приборов регулировочных элементов или подвижных компенсаторов.

В общем случае в конструкции измерительного прибора должны быть предусмотрены два регулировочных узла:

- регулировка нуля;
- регулировка чувствительности.

Регулировкой нуля уменьшают влияние аддитивной погрешности, постоянной для каждой точки шкалы.

Регулировкой чувствительности уменьшают влияние мультипликативных погрешностей, изменяющихся линейно с изменением измеряемой величины.

Одновременной регулировкой нуля и чувствительности можно свести систематическую погрешность к нулю в нескольких точках шкалы и уменьшить ее максимальное значение в несколько раз.

Систематические погрешности можно уменьшить посредством:

- экранирования помех;
- компенсации погрешности;
- введения обратной связи.

3.5. Расчёт погрешностей средств измерений

Расчет результирующей погрешности средств измерений (СИ) по погрешностям их измерительных преобразователей (ИП) можно осуществить методом структурного анализа, причем эта задача может решаться применительно к отдельному прибору или к совокупности приборов определенного типа.

Применительно к отдельному прибору находят погрешности прибора на отдельных отметках шкалы, либо оценивают границы, в которых лежат погрешности данного прибора. Эти задачи приходится решать при создании уникальных средств измерений и при поэлементной проверке.

Применительно к совокупности однородных СИ необходимо чаще всего определять долю приборов, погрешность которых находится в пределах заданных границ.

В общем случае информативный параметр сигнала на выходе прибора (y) связан с информативным параметром сигнала на входе X параметрами блоков прибора η_i , помехами и другими причинами аддитивных погрешностей Z_j зависимостью:

$$y = f(X, \eta_i, Z_j), (i = 1, 2, \dots, n), (j = 1, 2, \dots, m).$$

Абсолютная погрешность прибора при показании y :

$$\Delta_{\pi}(y) = y \sum V_i \varepsilon_i + \sum W_j Z_j,$$

где ε_i – относительное отклонение параметра η_i от его номинального значения η_{0i} : $\varepsilon_i = (\eta_i - \eta_{0i}) / \eta_{0i}$;

V_i – коэффициент влияния погрешности параметра η_i : $V_i = \frac{df}{d\eta_i} \frac{\eta_i}{y}$;

W_j – коэффициент влияния аддитивной погрешности Z_j : $W_j = \frac{df}{dZ_j}$.

Удобнее оценивать не абсолютную, а **относительную погрешность прибора**, отнесенную к конечному значению шкалы прибора:

$$\delta_k = \sum V_i \varepsilon_i + \sum W_j Z_j / y_k$$

Для решения задачи необходимо знать вид и параметры модели, а также характеристики ε_i и Z_j .

Обычно задаются предельными значениями ε_i и Z_j .

Тогда доверительная граница систематической погрешности приборов:

$$\bar{\delta} = K \sqrt{\sum (V_i \varepsilon_i)^2 + \sum (W_j Z_j)^2 / y_k^2}$$

Динамическая погрешность средства измерения определяется как разность его погрешности в динамическом режиме и статической погрешности.

Типичным случаем измерения, для которого существенна динамическая погрешность, является измерение с регистрацией сигнала, изменяющегося во времени. В этом случае **абсолютная динамическая погрешность**:

$$\Delta_d = (B / K - 1) X,$$

где B – оператор; K – коэффициент преобразования.

Оператор B зависит от формы сигнала на входе.

3.6. Описание случайных погрешностей и их числовая оценка

Конкретное значение случайной погрешности предсказать невозможно.

Но совокупность случайных погрешностей измерения подчиняется статистическим закономерностям.

Это обстоятельство позволяет применять к изучению и описанию случайных погрешностей измерения методы теории вероятностей и математической статистики.

В вероятностной модели случайные погрешности ΔX и сами результаты измерения рассматриваются как непрерывные случайные величины, которые могут принимать любые действительные значения.

Причем каждому интервалу ($x_1 \dots x_2$) соответствует вполне определенное число, называемое вероятностью попадания значения случайной величины X в этот интервал и обозначаемое:

$$P(x_1 < X < x_2)$$

Находить эти вероятности можно на основе закона распределения вероятностей случайной величины X . Чаще всего принимают $x_1 = -\infty$.

Тогда, обозначив $x_2 = x$, имеем:

$$F(x) = P(X < x),$$

где $F(x)$ – интегральная функция распределения:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x p(x) dx,$$

$p(x)$ – некоторая неотрицательная функция, называемая плотностью распределения и подчиняющаяся условию:

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx = 1.$$

При решении большинства практических задач нет необходимости знать все возможные значения случайной величины и соответствующие им вероятности. Удобнее пользоваться некоторыми количественными показателями, которые дают в сжатой форме достаточную информацию о случайной величине. Такие показатели называют числовыми характеристиками случайной величины. Основными из них являются:

- математическое ожидание $M(X)$;
- мода (M_o);
- медиана (Me);
- дисперсия $D(X)$.

Для непрерывной случайной величины X , возможные значения которой принадлежат интервалу $\{x_1 \dots x_2\}$, **математическое ожидание**:

$$M(X) = \int_{x_1}^{x_2} xp(x) dx,$$

Модой M_o непрерывной случайной величины называют такое ее значение X , при котором плотность распределения $p(x)$ имеет максимум.

Медиана Me непрерывной случайной величины — такое ее значение X , при котором равновероятно, что случайная величина окажется меньше или больше медианы, то есть справедливо равенство:

$$P(X < Me) = P(X > Me)$$

Если распределение одномодальное и симметричное, то математическое ожидание, мода и медиана совпадают.

Дисперсия является характеристикой рассеяния случайной величины относительно ее математического ожидания:

$$D(X) = M[X - M(X)]^2.$$

При оценке рассеивания удобнее пользоваться **средним квадратическим отклонением**:

$$\sigma = \sqrt{D(X)},$$

которое называют также стандартным отклонением или стандартом.

Дисперсию можно представить в виде:

$$D(X) = M(X^2) - [M(X)]^2.$$

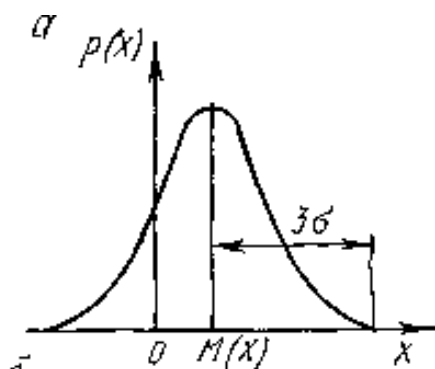


Рис. 3.5. Функция нормального распределения

Случайные погрешности измерения чаще всего подчиняются **закону нормального распределения (закону Гаусса)**.

Функция плотности распределения в данном случае имеет вид:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[x - M(X)]^2}{2\sigma^2}\right\},$$

где параметр σ характеризует точность измерений.

При расчетах широко применяется нормированное нормальное распределение, которое получается при переходе к случайной величине $z = [X - M(X)] / \sigma$:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\};$$

$$F(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} dz.$$

Для нахождения $F(z)$ применяют таблицы значений **функции Лапласа** $\Phi(z)$, определяемой выражением:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp\left\{-\frac{z^2}{2}\right\} dz.$$

При $z > 0$: $F(z) = 0,5 + \Phi(z)$, а при $z < 0$: $F(z) = 0,5 - \Phi(z)$,

Распределение Максвелла (Рэлея) случайной величины (рис.3.6.), принимающей только неотрицательные значения (X и Y — случайные координаты точки, распределенные независимо и нормально), характеризует такие погрешности, как эксцентриситет, несоосность, биение, разностенность, непараллельность или неперпендикулярность.

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2}.$$

Если в качестве нормированной переменной принять $z = R/\sigma$, где σ — стандартное отклонение параметра R , то функция плотности распределения Максвелла:

$$p(z) = 0,655^2 z \exp\left(-\frac{0,655z^2}{2}\right).$$

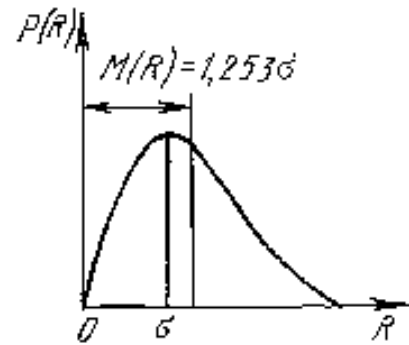


Рис. 3.6. Функция распределения Максвелла

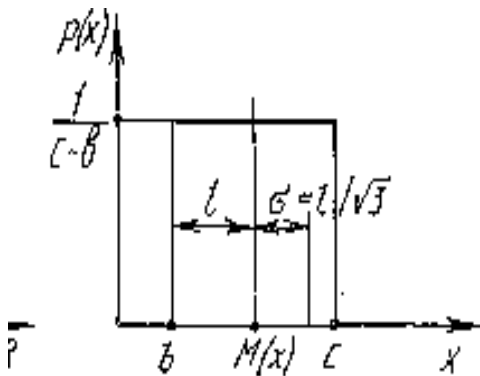


Рис. 3.7. Функция равномерного распределения

Равномерное распределение свойственно погрешностям округления до ближайшего деления шкалы прибора, а также погрешностям, соизмеримым с отсчетом (рис. 3.7).

В данном случае функция плотности распределения имеет вид:

$$p(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < b; \\ 1/(c-b) & \text{при } b \leq x \leq c; \\ 0 & \text{при } x > c. \end{cases}$$

3.7. Числовая оценка случайных погрешностей

Совокупность всех возможных значений исследуемой случайной погрешности называется **генеральной совокупностью**.

Множество значений случайной погрешности, полученное в результате наблюдения над нею, называют **случайной выборкой** или просто выборкой.

Число объектов в генеральной совокупности и в выборке характеризует их объем. Генеральная совокупность может иметь бесконечный объем.

Основной задачей является получение научно обоснованных выводов о числовых характеристиках генеральной совокупности случайных погрешностей по выборке.

Выборочная оценка должна обладать следующими свойствами:

- несмещенностью;
- эффективностью;
- состоятельностью.

Оценку $\underline{A}$ параметра A называют **несмещенной**, если ее математическое ожидание равно оцениваемому параметру. Требование несмещенности гарантирует отсутствие систематических ошибок при оценке параметров. Так как $\underline{A}$ — случайная величина, значение которой изменяется от выборки к выборке, то меру ее рассеивания характеризуют дисперсией $D(\underline{A})$. Из двух оце-

нок A следует отдать предпочтение той, которая обладает меньшим рассеиванием (т.е. меньшей дисперсией).

Несмещенную оценку $\underline{A}$ которая имеет наименьшую дисперсию среди всех возможных несмещенных оценок параметра A , вычисленных по выборкам одного и того же объема, называют **эффективной оценкой**.

Оценку $\underline{A}$ параметра A называют **состоятельной**, если при неограниченном увеличении объема выборки ее значение приближается сколь угодно близко к значению оцениваемого параметра.

На практике не всегда удастся удовлетворить одновременно требованиям несмещенности, эффективности и состоятельности оценки параметра. Иногда для простоты расчетов целесообразно использовать незначительно смещенную оценку.

Оценку неизвестного параметра генеральной совокупности одним числом называют **точечной оценкой**.

Точечной оценкой математического ожидания $M(X)$ случайной величины X является **среднее арифметическое значение $\underline{X}$** , вычисленное по результатам m независимых наблюдений:

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m X_t$$

Эта оценка является несмещенной, состоятельной и эффективной. Она имеет дисперсию σ^2/m , если дисперсия случайной величины X равна σ^2 .

Несмещенной оценкой дисперсии генеральной совокупности $D(X)$ является исправленная **выборочная дисперсия**:

$$S^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2$$

Эта оценка является состоятельной, но не эффективной.

При малом числе наблюдений необходимо использовать интервальное оценивание, так как в этом случае точечная оценка недостаточно надежна.

Необходимо по данным выборки построить числовой интервал, в котором с заранее выбранной вероятностью находится значение оцениваемого параметра.

Доверительным интервалом ($\underline{A}_2$ — $\underline{A}_1$) для параметра A называют такой интервал, для которого с заранее выбранной вероятностью $P=1 - \alpha$, близкой к единице, можно утверждать, что:

$$P(\tilde{A}_1 < A < \tilde{A}_2) = 1 - \alpha$$

Чем меньше для выбранной вероятности ($\underline{A}_2$ — $\underline{A}_1$), тем точнее оценка параметра A .

Доверительный интервал меняется от выборки к выборке.

Вероятность $P=1-\alpha$ называется доверительной вероятностью, а число α — уровнем значимости.

Выбор доверительной вероятности зависит от конкретной решаемой задачи.

Если случайная величина распределена нормально, а дисперсия этого распределения неизвестна, то доверительный интервал для математического ожидания $M(X)$ определяется неравенством:

$$\bar{X} - t(P, m) \cdot S / \sqrt{m} < M(X) < \bar{X} + t(P, m) \cdot S / \sqrt{m},$$

где $t(P, m)$ – критерий Стьюдента, выбираемый из соответствующей таблицы, при доверительной вероятности P и числе степеней свободы $f = m-1$.

Если случайная величина распределена нормально, доверительный интервал для дисперсии генеральной совокупности при доверительной вероятности $P=1-\alpha$ определяется неравенством:

$$\frac{m-1}{\chi_1^2} S^2 < \sigma^2 < \frac{m-1}{\chi_2^2} S^2,$$

где χ^2 — **критерий Пирсона**, выбираемый из соответствующей таблицы, который соответствует доверительной вероятности, равной $0,5\alpha$, для $\chi_2^2 - (1-0,5\alpha)$ определяется при $f = m-1$.

3.8. Объединение результатов неравноточных измерений

Одну и ту же величину часто измеряют различными приборами, в разных лабораториях или разные операторы. Иногда возникает задача объединения полученных данных для того, чтобы получить наиболее точную оценку измеряемой величины.

Пусть имеется n групп измерений одной и той же величины A с соответствующими оценками измеряемой величины $\underline{X}_1, \underline{X}_2, \dots, \underline{X}_n$, причем $M(\bar{X}_1) = M(\bar{X}_2) = \dots = M(X_n) = A$

Известны оценки дисперсии и число наблюдений в каждой группе $m_1, m_2, \dots, m_n$.

Оценка A по данным всех измерений:

$$\bar{\bar{X}} = \sum_{i=1}^n g_i X_i,$$

где $\sum_{i=1}^n g_i = 1; g_i = \frac{1/S_i^2}{\sum_{i=1}^n (1/S_i^2)}$

g_i – вес i -й серии наблюдений.

Дисперсия, характеризующая точность оценки величины A , определяется по формуле:

$$S^2(\bar{\bar{X}}) = 1 / \sum_{i=1}^n m_i / S_i^2$$

Погрешность определения веса любой серии наблюдений практически не отражается на точности объединенной оценки параметра A .

$$\frac{\Delta \bar{\bar{X}}}{\bar{\bar{X}}} \leq \frac{\Delta g}{g} \frac{|\bar{\bar{X}} - \bar{\bar{X}}_i|}{\bar{\bar{X}}}$$

Второй сомножитель правой части этого неравенства — порядка 0,01.

Поэтому погрешность оценки среднего взвешенного из-за погрешности определения весов будет не менее чем в 100 раз меньше последней.

В отдельных случаях можно пренебречь систематическими погрешностями измерения и предположить, что полученные оценки отличаются незначительно и обусловлены случайными погрешностями измерения.

Гипотеза о равенстве дисперсий в n группах измерений проверяется с помощью критерия Пирсона.

Наблюдаемое значение критерия:

$$\chi^2 = M / \left[1 + \frac{1}{3(n-1)} \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i - 1} - \frac{1}{N} \right) \right],$$

где

$$M = N \ln \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (m_i - 1) S_i^2 \right] - \sum_{i=1}^n (m_i - 1) \ln S_i^2;$$

$$N = \sum_{i=1}^n (m_i - 1); \quad m_i > 4; n > 2$$

Для выбранной доверительной вероятности P и числа степеней свободы $f=n-1$, если критическое значение критерия Пирсона: $\chi_g^2 < \chi_k^2$, то гипотеза о равенстве дисперсий принимается.

Тогда вес i -й серии наблюдений следует определять как:

$$g_i = m_i / N_1 \left(N_1 = \sum_{i=1}^n m_i \right),$$

а дисперсию оценки параметра A — по формуле:

$$S^2(\bar{\bar{X}}) = \frac{1}{N_1(N_1-1)} \left[\sum_{i=1}^n (m_i - 1) S_i^2 + \sum_{i=1}^n m_i (\bar{X}_i - \bar{\bar{X}})^2 \right]$$

При измерении одной величины n приборами возможны ситуации, когда реальные погрешности измерения неизвестны, а известны только оценки границ погрешностей Δ_i ($i=1, 2, \dots, n$), объединяемых результатов измерений при заданном значении доверительной вероятности P .

Тогда доверительная погрешность оценки параметра A , если погрешности приборов имеют равномерное распределение и $\Delta_{ш}=\Delta$, будет:

$$\Delta_{\Sigma} = K \Delta / \sqrt{n},$$

где K зависит от доверительной вероятности (может колебаться от 1,1 при $P=0,95$ до 1,4 при $P=0,99$).

3.9. Погрешности косвенных измерений

Искомое значение величины Y при косвенных измерениях находят путем согласованных измерений других величин X_i , связанных с измеряемой величиной известной зависимостью. Величина X_i называется аргументом. Значения аргументов чаще всего определяют в результате прямых измерений.

Различают линейные и нелинейные косвенные измерения.

Для *линейных косвенных измерений*:

$$Y = \sum_{i=1}^n b_i x_i$$

где b_i – постоянный коэффициент; n – число слагаемых.

Для *нелинейных косвенных измерений*:

$$Y = \prod_{i=1}^n f_i(x_i)$$

Оценка Y при линейных косвенных измерениях определяется по формуле:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n b_i \bar{X}_i,$$

где $\bar{X}_i$ – оценка математического ожидания i -го аргумента.

Погрешность косвенного измерения Y в данном случае:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n b_i (\Delta X_i),$$

где ΔX_i – погрешность измерения i -го аргумента.

Дисперсия оценки величины Y при косвенном линейном измерении:

$$S^2(\bar{Y}) = \sum_{i=1}^n b_i^2 S_i^2(\bar{X}_i),$$

где $S_i^2(\bar{X}_i^2)$ – дисперсия оценки аргумента X_i .

Это выражение верно в случае независимости погрешностей измерений аргументов.

При нелинейных косвенных измерениях значение $\bar{Y}$ оценивается выражением:

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n f_i(\bar{X}_i)$$

Такая оценка является несмещенной и состоятельной, если оценки $\bar{X}_i$ являются состоятельными.

Погрешность косвенного измерения в данном случае:

$$\Delta Y = \sum_{i=1}^n W_i(\Delta X_i),$$

где W_i – коэффициент влияния 1-го аргумента:

$$W_i = \frac{\partial}{\partial X_i}(Y)$$

При отсутствии корреляционной зависимости между погрешностями измерений аргументов дисперсия оценки $\bar{Y}$ вычисляется по формуле:

$$S^2(\bar{Y}) = \sum_{i=1}^n W_i^2 S_i^2(\bar{X}_i)$$

Если $W_i S_i(\bar{X}_i) < 0,3S(\bar{Y})$, то погрешность оценки 1-го аргумента не существенно влияет на погрешность косвенного измерения.

Аналогичный вывод можно сделать относительно нескольких аргументов, если:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n W_i^2 S_i^2(\bar{X}_i)} < 0,3S(\bar{Y})$$

Повышение точности косвенного измерения необходимо обеспечивать за счет повышения точности оценки тех аргументов, которые дают существенный вклад в дисперсию оценки $\bar{Y}$.

3.10. Обнаружение грубых погрешностей

Если в полученной группе результатов измерений одно-два резко отличаются от остальных, а описки, ошибки в снятии показаний и тому подобные промахи не установлены, следует проверить, не являются ли они грубыми по-

грешностями, подлежащими исключению. При решении данной задачи предполагается, что результаты наблюдений подчиняются нормальному закону распределения.

Грубые погрешности возникают при случайном резком изменении условий измерения.

Для решения задачи имеющиеся результаты измерения располагают в вариационный ряд монотонно возрастающих значений X_i ($i=1, 2, \dots, m$).

Проверке подлежит наименьший X_1 (или наибольший X_m) член ряда. Сначала вычисляются числовые характеристики результатов наблюдений:

$$\bar{X} = \frac{1}{m} \sum X_i; S^2 = \frac{1}{m-1} \sum (X_i - \bar{X})^2,$$

затем наблюдаемое значение критерия $\nu_H = |\bar{X} - X_1|/S$.

Задавшись доверительной вероятностью P , определяем по таблице критическое значение критерия ν_K , которое зависит также от числа измерений m .

Если $\nu_H < \nu_K$, то принимается гипотеза H_1 – все наблюдения проводились в одинаковых условиях и значение X_1 (или X_m) составляет с остальными результатами однородную выборку.

Если это неравенство нарушается, т.е. $\nu_H > \nu_K$, то «подозрительный» результат X_1 следует исключить из дальнейшего рассмотрения.

Если в выборке несколько «подозрительных» результатов измерения, то данная процедура может применяться поочередно к каждому из них в отдельности.

Пример.

Результаты измерения выборки деталей, обработанных на бесцентрово-шлифовальном станке, образуют следующий ряд отклонений от номинала (мкм): 26; 30; 25; 28; 40; 32; 26; 22; 28; 31. Требуется определить с доверительной вероятностью, равной 0,95, является ли отклонение в 40 мкм грубой погрешностью.

$$\text{Решение, } \bar{X} = \frac{1}{10} 288 = 28,8$$

$$S^2 = \frac{1}{9} 219,6 = 24,4$$

$$\nu_H = |28,8 - 40|/\sqrt{24,4} = 2,267$$

Согласно таблице, $\nu_K=2,294$.

Так как $\nu_H < \nu_K$, то отклонение в 40 мкм не является грубой ошибкой.

Библиографический список

1. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 3-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
2. Контрольно-измерительные приборы и инструменты: учебное пособие / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
3. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.
4. Атамалян, Э.Г. Приборы и методы измерения электрических величин: учебное пособие для вузов / Э. Г. Атамалян. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Дрофа, 2005. – 415 с.
5. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В.В. Ключева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	
1. ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ ИСПЫТАНИЯ (ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ).....	6
2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ МАШИН...	9
2.1. Контактные измерения	11
2.2. Бесконтактные оптические методы и средства измерений	19
2.3. Бесконтактные неоптические методы измерений	30
2.4. Методы и средства измерения параметров движения	35
2.5. Методы и средства измерения силовых и энергетических величин	38
2.5.1. Измерение сил	38
2.5.2. Измерение крутящих моментов	41
2.5.3. Измерение мощности	42
2.6. Методы и средства измерения температуры.....	43
2.7. Методы и средства механических испытаний	51
2.7.1. Испытания статическим нагружением	51
2.7.2. Испытания ударной нагрузкой	53
2.7.3. Испытания циклической нагрузкой	53
2.7.4. Измерение твердости.....	54
2.7.5. Испытания на износостойкость.....	55
2.8. Определение механических свойств и структуры конструкционных материалов	56
2.9. Определения остаточных напряжений	58
3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.....	59
3.1. Виды погрешностей измерений.....	59
3.2. Характеристики средств измерений.....	61
3.3. Погрешности средств измерения	63
3.4. Уменьшение систематических погрешностей средств измерений.....	65
3.5. Расчёт погрешностей средств измерений.....	66
3.6. Описание случайных погрешностей и их числовая оценка	67
3.7. Числовая оценка случайных погрешностей	70
3.8. Объединение результатов неравноточных измерений.....	72
3.9. Погрешности косвенных измерений.....	74
3.10. Обнаружение грубых погрешностей.....	75
Библиографический список	77

Учебное издание

Борис Алексеевич Шкарин

**МЕТОДЫ, СРЕДСТВА И ПРИБОРЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Учебное пособие

Редактор И.Т. Куликова

Подписано в печать 23.06.2014. Формат 60 × 90/16

Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл.-п.л. 4,9. Тираж экз. Заказ №

Отпечатано: РИО, ВоГУ 160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15

