

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ
КАЗАХСТАН**

**Казахский национальный технический университет
имени К.И.Сатпаева**

Н. П. Агапова

**КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА
ГОРНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН**

**Учебное пособие для студентов
специальности 050724 «Технологические машины
и оборудование»**

**Рекомендовано Республиканским учебно-методическим
объединением в качестве учебного пособия**

Алматы 2008

УДК 681
ББК 20.4.1

Агапова Н.П. Контрольно-измерительная аппаратура горных и гидравлических машин. – Алматы: КазНТУ, 2008. 146 с.

ISBN 978–601–228–027–2

В учебном пособии рассмотрена теория методов измерения и физические основы приборов контроля параметров работы горных и гидравлических машин. Даны сведения о конструкции приборов для измерения и функции геометрических величин, механических, типовых и электрических параметров, давления и разрежения, расхода жидкостей и газов. Приведены сведения о классификации методов измерения и контроля, статических и динамических характеристиках и динамических характеристиках измерительных устройств, возможных погрешностей и надежности средств измерений. Рассмотрены системы передачи измерительной информации, вопросы монтажа, поверки и эксплуатации контрольно-измерительной аппаратуры.

Ил. 79. Табл. 10. Библиогр. – 20 назв.

ББК 20.4.1

Рецензенты: *А.М. Ткаченко*, зав. лаб. механизации и роботизации подземных горных работ ИГД им. Д.А. Кунаева, д-р техн. наук, проф.
С.А. Заурбеков, проректор по учебной работе Каспийского общественного университета, канд. техн. наук, доц.
Т.М. Мендыбаев, зав. каф. «Технология машиностроения», д-р техн. наук, проф.

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2008 г.

ISBN 978–601–228–027–2

© Н.П. Агапова,
© КазНТУ, 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

Контрольно-измерительная аппаратура, приборы и инструменты находят широкое применение при эксплуатации технологических машин, диагностике их технического состояния, получении достоверной информации о технических параметрах. Такая информация особенно важна для горных и гидравлических машин, работающих в сложных условиях. Своевременно полученная объективная информация о параметрах работы горных и гидравлических машин позволяет продлить срок службы, обеспечить безаварийную работу машин и агрегатов, снизить их простои.

В учебной дисциплине «Контрольно-измерительная аппаратура» рассматриваются вопросы, связанные с измерениями и приборами для контроля и фиксации параметров технологических машин в процессе их работы.

В данном учебном пособии рассматриваются в соответствии с учебной программой единицы измерения, основы теории ошибок, математические методы обработки результатов измерений. Излагаются вопросы: для какой цели применяют контрольно-измерительные приборы и какие технические вопросы решаются с их помощью; каковы существующие методы измерений, каково устройство приборов, как пользоваться этими приборами для решения контрольных технологических задач и определения заданных технологических параметров.

Количество приборов различного типа и назначения, а также с различными техническими характеристиками непрерывно растет. Только при разумной и четкой классификации можно свободно ориентироваться в существующем огромном потоке информации об измерительных приборах. Правильная классификация защищает специалиста от «лавины информации».

Научной основой системы автоматического контроля являются метрология и физические принципы измерения параметров технологических процессов, а технической базой этих систем служат средства измерения и преобразования соответствующих параметров. Весь этот круг вопросов и рассматривает дисциплина «Контрольно-измерительная аппаратура» применительно к горным машинам, гидравлическим машинам, гидроприводам и системам гидропневматики.

Для усвоения учебного материала данной дисциплины обучающемуся необходимы знания по математике, физике, химии, гидродинамике, электротехнике.

Терминология, используемая в учебном пособии, соответствует действующим стандартам, размерности физических величин, приведенным в системе СИ.

ВВЕДЕНИЕ

Все процессы и явления окружающего мира воспринимаются и изучаются человеком с помощью сравнения и количественной оценки, которые осуществляются путем различных измерений. Измерения проводятся с помощью специальных механических средств, различных по сложности и принципам действия. Эти технические средства называют *измерительными устройствами, установками или системами*.

Исторически развитие измерительной техники связано с развитием потребностей человеческого общества. Современный мир характеризуется бурным развитием науки и производства. Машины и механизмы становятся функционально сложными, и для их эффективной эксплуатации требуется непрерывный контроль над режимом и параметрами работы. Это осуществляется с помощью приборов и измерительной техники.

Совокупность технических средств, служащих для выполнения измерений методов и приемов проведения измерений и интерпретации их результатов, принято определять понятием *измерительная техника*.

Современная научно-техническая революция отмечается бурным развитием и широким внедрением автоматического управления во всех отраслях промышленного производства. Важнейшим условием функционирования систем автоматизированного управления является своевременное получение объективной информации, отражающей состояние объекта управления и ход технического процесса.

Основным средством получения информации, поступившей в систему управления, являются измерительные приборы.

Историческое совершенствование измерительной техники неразрывно связано с потребностями общества. С развитием науки и производства, которые не могут существовать без широчайшего применения самых разнообразных измерений и измерительных устройств. Место измерительной техники в современном мире могут охарактеризовать такие данные. Затраты на измерительную технику в настоящее время составляют 15–20 % всех материальных затрат на общественное производство.

Основной потребитель измерительной техники – это промышленное производство. Широко она применяется при производстве и эксплуатации горных и гидравлических машин, в системах гидропривода является неотъемлемой частью технических процессов, т. к. используется для получения информации о многочисленных режимных параметрах, определяющих ход происходящих процессов.

Область измерительной техники, объединяющая измерительные устройства и методы измерений, использующиеся в технологических процессах, называется *технологическими измерениями*.

Представление о том, какие параметры и в каком относительном количестве измеряются на производстве, дает следующая таблица.

Таблица

Измерения параметров производств с непрерывным и дискретным характером технологических процессов

Параметр	Количество, %, от общего числа измерений для каждого из производств	
	производства с непрерывными процессами	производства с дискретными процессами
Температура	50	8
Расход (массовый, объемный) вещества	15	4
Количество (масса, объем) вещества	5	5
Давление	10	4
Уровень	6	4
Число изделий	-	25
Длина (размеры, положение, расстояние)	-	25
Время	4	15
Состав веществ	4	
Прочие (физико-химические свойства, напряжение, ток, скорость)	6	10

Измерения давления, температуры, расхода и уровня называются теплотехническими измерениями состава и физико-химических веществ – физико-химическими измерениями, а измерения электрических величин – электрическими измерениями.

Знание основ теории измерения устройства и основных правил эксплуатации контрольно-измерительных приборов являются в настоящее время неременным условием правильной эксплуатации технологических машин и оборудования.

Изучение данной дисциплины дает возможность бакалаврам-механикам получить знания и умения работать с первичными приборами и измерениями параметрических величин, обеспечивающими надежную и безаварийную работу горных и гидравлических машин, используемых в горном производстве.

1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ

1.1. Понятие об измерении

Теоретической основой измерительной техники является метрология.

Метрология (от греческого *metron* – мера и *logos* – учение, понятие) – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Как следует из определения, предметом метрологии, помимо самих измерений, является обеспечение их единства и требуемой точности. При этом под единством измерений понимают такое состояние измерений, при котором их результаты выражений в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Рассмотрим некоторые основные термины и определения, связанные с техническими измерениями.

Физическая величина (ФВ) – свойство, общее в качественном отношении многим физическим объектам (физическим системам, их состояниям и происходящим в них процессам), но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта (например, длина, масса, время, сила тока и т. д.).

Размер ФВ – количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина» (например, размер длины, массы, силы тока и т. д.).

Значение ФВ – оценка физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц, причем отвлеченное (безразмерное) число, входящее в значение физической величины, **называется числовым значением** (например, 1 м, 5 г, 10 А и т. д.).

Истинное значение ФВ – значение ФВ, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Например, плотность дистиллированной воды при температуре 4 °С имеет вполне определенное значение.

Действительное значение ФВ – значение ФВ, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному, что для данной цели может быть использовано вместо него. Например, действительная плотность дистиллированной воды при температуре 4 °С составляет 1 г/см³.

Система ФВ – совокупность ФВ, связанных между собой зависимостями.

Основная ФВ – физическая величина, входящая в систему и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы. Например, в системе ЛМТ основные величины – длина, масса, время.

Производная ФВ – физическая величина, входящая в систему и определяемая через основные величины этой системы по известным физическим зависимостям.

Размерность ФВ – выражение, отражающее связь величины с основными величинами системы, в которой коэффициент пропорциональности равен единице. Размерность величины представляет собой произведение основных величин, возведенных в соответствующие степени.

Единица ФВ – физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице. Единицы одной и той же ФВ могут различаться по своему размеру. Например, метр, фут и дюйм, являясь единицами длины, имеют различные числовые значения: 1 фут = 0,3048 м, 1 дюйм = 0,0254 м.

Основная единица ФВ – единица основной физической величины, выбранная произвольно при построении системы единиц. Например, основные единицы Международной системы единиц (СИ): метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела.

Производная единица ФВ – единица производной физической величины, образуемая по определяющему эту единицу уравнению из основных единиц данной системы единиц.

Система единиц ФВ – совокупность основных и производных единиц, относящаяся к некоторой системе величин и образованная в соответствии с принятыми принципами. Например, система единиц СГС, система МКСА, Международная система единиц (СИ).

Измерение – нахождение значения ФВ опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерения бывают прямыми, косвенными, совокупными и совместными. Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение ФВ находят непосредственно из опытных данных.

Наблюдение при измерении – экспериментальная операция, выполняемая в процессе измерений, в результате которой получают одно значение из группы значений величины, подлежащих совместной обработке для получения результата измерения.

Метод измерений – совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Средство измерения (СИ) – техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства (характеристики).

Мера – СИ, предназначенное для воспроизведения ФВ заданного размера (например, гиря, температурная лампа).

Измерительный прибор – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем (например, линейка, штангенциркуль).

Измерительный преобразователь – СИ, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не воспринимаемой непосредственно наблюдателем.

Измерительная система – совокупность СИ и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления (например, система слежения за спутниками).

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерения σ – параметр функции распределения результатов измерений, характеризующий их рассеивание, равный корню квадратному из дисперсии результатов измерений. Пояснить это можно следующим образом: если навести винтовку на какую-либо точку, жестко ее закрепить и произвести несколько выстрелов, то не все пули попадут в эту точку. Они будут располагаться вблизи точки прицеливания. Степень их разброса от указанной точки и будет характеризоваться **средним квадратическим отклонением**.

Эталон единицы – СИ (или комплекс СИ), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

Первичный эталон – эталон, обеспечивающий воспроизведение единицы с наивысшей в стране (по сравнению с другими эталонами той же единицы) точностью.

Вторичный эталон – эталон, значение которого устанавливают по первичному эталону.

Государственный эталон – первичный или специальный эталон, официально утвержденный в качестве исходного для страны.

Эталон-копия – вторичный эталон, предназначенный для передачи размеров единиц рабочим эталонам.

Стандартный образец – мера для воспроизведения единиц величины, характеризующих свойства или состав веществ и материалов.

1.2. Классификация измерений

Измерения классифицируют по ряду признаков, наиболее важные из которых приведены на рис. 1[21].

По первому классификационному признаку измерения подразделяют на: *статические*, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени в процессе измерения, и *динамические*, при которых измеряемая величина изменяется в процессе измерения.

Классификация по второму признаку является в большой степени условной, однако широко применяется в измерительной технике. Ею определяются сложившиеся совокупности родственных по природе или применению в отдельных областях науки или техники физических величин.

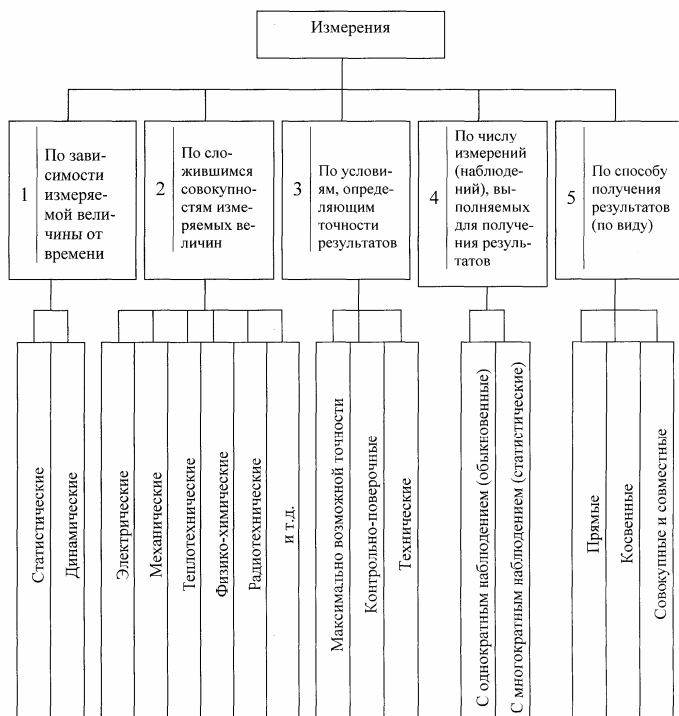


Рис. 1.1. Классификация измерений

По третьему признаку измерения подразделяют на три класса.

Измерения максимально возможной точности, достижимой при современном уровне техники. Это измерения, связанные с созданием и воспроизведением эталонов, а также измерения универсальных физических констант.

Контрольно-поверочные измерения, погрешности которых не должны превышать заданного значения. Такие измерения осуществляются в основном государственными и ведомственными метрологическими службами.

Технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений. Технические измерения являются наиболее распространенными и выполняются во всех отраслях хозяйства и науки. К ним, в частности, относятся и технологические измерения.

Четвертым классификационным признаком служит число измерений (наблюдений при измерении или просто наблюдений), выполняющихся для получения результата. Здесь различают измерения с однократным наблюдением и статистические измерения с многократными наблюдениями.

По пятому признаку измерения подразделяют в зависимости от вида уравнения измерения, что и определяет способ получения результата.

В метрологии принято различать прямые, косвенные и совокупные измерения.

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. Математически прямое измерение можно описать уравнением

$$X = A[X], \quad (1.1)$$

где A – отвлеченное число, называемое числовым значением физической величины; $[X]$ – единица физической величины.

Косвенными называют измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

Совокупными называют производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые уравнений получают при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

Совместными называют проводимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин для нахождения зависимости между ними.

1.3. Методы измерений

Прямые измерения, являясь самостоятельными и наиболее распространенными, в то же время служат основой для более сложных видов измерений. В связи с этим методы прямых измерений являются общими для всех видов измерений.

С учетом того, что метод измерений представляет собой совокупность приемов использования принципов и средств измерений, различают два метода: метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой. Мера – это средство измерений, предназначенных для воспроизведения физической величины заданного размера.

Классификация методов измерений приведена на рис. 1.2. [21]. Классификационным признаком в таком разделении методов измерений является наличие или отсутствие при измерениях меры.

Метод непосредственной оценки (отсчета) – это метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия.

Метод сравнения с мерой – метод измерения, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Методы сравнения в зависимости от наличия или отсутствия при сравнении разности между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, подразделяют на нулевой и дифференциальный.

Нулевой метод – это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (прибор сравнения, или компаратор, – измерительный прибор, предназначенный для сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно).

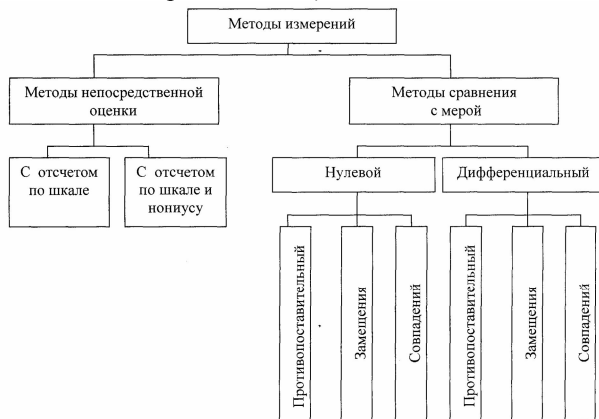


Рис. 1.2. Классификация методов измерений

Схема реализации измерений методом непосредственной оценки представлена на рис. 1.3, а нулевыми методами в сравнении с мерой – на рис. 1.4.

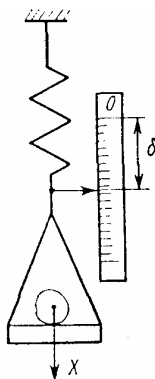


Рис. 1.3. Схема реализации измерений методом непосредственной оценки

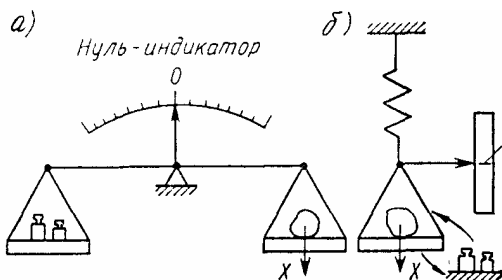


Рис. 1.4. Схемы реализации измерений нулевыми методами сравнения с мерой

Дифференциальный метод – это метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной, воспроизводимой мерой.

Как в нулевом, так и в дифференциальном методе могут быть выделены методы противопоставления, замещения и совпадения.

Метод противопоставления – метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами.

Метод замещения – метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

Метод совпадения – метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Дифференциальный метод измерений характеризуется тем, что с помощью измерительного прибора методом непосредственной оценки измеряется разность между измеряемой величиной и величиной воспроизводимой мерой.

Этот метод позволяет получить высокоточные результаты даже при использовании для измерения указанной разности относительно грубых средств измерений.

Реализация дифференциального метода возможна только при условии получения высокоточной меры, близкой по значению к измеряемой величине.

1.4. Единицы измерения

Выше было дано определение измерения как процесса сравнения измеряемой *величины* с единицей измерения.

Величиной называется количественная характеристика физического типа, явления или процесса.

Число, выражающее значение величины, зависит от единицы измерения. Если в уравнении

$$Q = qu, \quad (1.2)$$

за единицу измерения вместо u принять другую величину u' , то оно примет вид

$$Q = q'u'. \quad (1.3)$$

Числовое значение q измеряемой величины зависит от выбора определенного множителя – единицы измерения u . Сравнивая уравнения (1.2) и (1.3), получим, что $qu = q'u'$, или

$$q' = q \frac{u}{u'}. \quad (1.4)$$

Следовательно, для перехода от результата измерения q , выраженного в единице u , к результату q' , выраженному в единице u' , необходимо q умножить на отношение единиц.

Единицы измерений подразделяют на независимые, производные, кратные и дольные.

Независимыми называют единицы, установленные независимо от других единиц (произвольно выбранные). К таким единицам относятся метр, килограмм, секунда, градус Кельвина, ампер, свеча. Число независимых величин стремятся свести к минимуму.

Производными называют единицы, определяемые на основании закономерной связи между величинами, для которых эти единицы устанавливаются, и величинами, единицы которых выбраны независимо.

Единицы, по отношению к которым определяется производная единица, носят название *основных* единиц. Формула связи производной единицы с основными называется формулой размерности, а показатели степени ее членов являются *размерностями*.

В ряде случаев основные и производные единицы по своей величине могут оказаться неудобными для практического пользователя. Поэтому в технике измерений часто применяют единицы, представляющие краткие или долгие значения.

Кратная единица ФВ – единица, которая в целое число раз больше основной или производной единицы.

Дольная единица ФВ – единица, которая в целое число раз меньше основной или производной единицы.

Кратные и долгие единицы ФВ образуются благодаря соответствующим приставкам к основным единицам (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Приставки СИ и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
10^{15}	пета	P	П
10^{12}	тера	T	Т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санتي	c	с
10^{-3}	милли	m	мк
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф

По мере развития техники и международных связей трудности использования результатов измерений, выраженных в различных единицах, возрастали и тормозили дальнейший научно-технический прогресс. Возникла необходимость в создании единой системы единиц физических величин.

Системой единиц называется совокупность основных (выбранных независимо) и производных единиц измерения, охватывающих все или только некоторые области измерения (механические, электрические, тепловые и другие измерения).

Рассмотрим наиболее распространенную во всем мире и принятую у нас в стране Международную систему единиц (СИ), содержащую семь основных единиц и две дополнительные. Основные единицы ФВ этой системы приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Основные единицы СИ

Величина				
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Длина	L	метр	m	М
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд

Производные единицы системы СИ образуются с помощью простейших уравнений связи между величинами, поскольку эта система когерентна, $K=I$. В этой системе размерность производной физической величины Q в общем виде определится следующим образом:

$$[Q] = [L]^a [M]^b [T]^c [I]^d [\Theta]^e [J]^f [N]^g,$$

где [L] – единица длины, м; [M] – единица массы, кг; [T] – единица времени, с; [I] – единица силы тока, А; [Θ] – единица термодинамической температуры, К; [J] – единица силы света, кд; [N] – единица ко-

личества вещества, моль; $\alpha, \gamma, \beta, \delta, \varepsilon, \omega, \lambda$ – целые положительные или отрицательные числа, включая и 0.

1.5. Погрешности измерения

Применяемые при измерениях методы и технические средства не являются идеальными, а органы восприятия человека не могут идеально воспринимать показания приборов. Поэтому после завершения процесса измерения остается некоторая неопределенность в наших знаниях об объекте измерения, т. е. получить истинное значение физической величины невозможно. В теории измерений мерой неопределенности результата измерения является погрешность результата наблюдения.

Классификация погрешностей измерения приведена на рис. 1.5 [21].

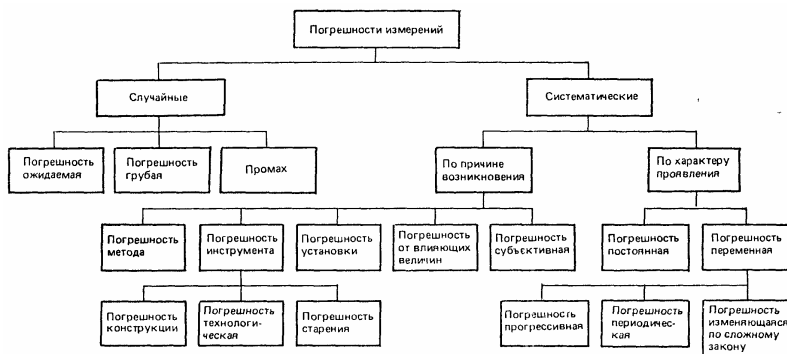


Рис. 1.5. Классификация погрешностей измерений

Под *погрешностью результата измерения*, или просто погрешностью измерения, понимается отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой физической величины. Записывается это следующим образом:

$$\Delta = X_{\text{изм}} - X, \quad (1.5)$$

где $X_{\text{изм}}$ – результат измерения; X – истинное значение ФВ.

Однако, поскольку истинное значение ФВ остается неизвестным, то неизвестна и погрешность измерения. Поэтому на практике имеют дело с приближенными значениями погрешности или с так называемыми их оценками. В формулу для оценки погрешности подставляют

вместо истинного значения ФВ ее действительное значение. Под действительным значением ФВ понимается ее значение, полученное опытным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Таким образом, формула для оценки погрешности имеет следующий вид:

$$\Delta = X_{\text{изм}} - Q_0, \quad (1.6)$$

где Q_0 – действительное значение ФВ.

Можно выделить четыре основные группы погрешностей измерения:

- погрешности, вызванные методиками выполнения измерения (погрешность метода измерения);
- погрешность средств измерения;
- погрешность органов чувств наблюдателей (личные погрешности);
- погрешности, обусловленные влиянием условий измерения.

Все эти погрешности дают *суммарную погрешность* измерения. В метрологии принято разделять суммарную погрешность измерения на две составляющие – случайную и систематическую погрешности.

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности результатов измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) в повторных наблюдениях, проведенных с одинаковой тщательностью одной и той же неизменяющейся (детерминированной) ФВ.

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных наблюдениях одной и той же неизменяющейся ФВ.

В общем случае в результатах измерения всегда присутствуют эти обе составляющие. На практике часто бывает так, что одна из них значительно превышает другую. В этих случаях меньшей составляющей пренебрегают. Например, при измерениях, проводимых с помощью линейки или рулетки, как правило, преобладает случайная составляющая погрешности, а систематическая – мала, ею пренебрегают. Случайная составляющая в этом случае объясняется следующими основными причинами:

- неточностью (перекосом) установки рулетки (линейки);
- неточностью установки начала отсчета;
- изменением угла наблюдения;
- усталостью глаз;
- изменением освещенности.

Систематическая погрешность возникает из-за несовершенства метода выполнения измерения, погрешностей СИ, неточного знания математической модели измерения, из-за влияния условий, погрешностей градуировки и поверки СИ, личных причин.

Поскольку случайные погрешности результатов измерения являются случайными величинами, в основе их обработки лежат методы теории вероятностей и математической статистики. Случайная погрешность характеризует такое качество, как точность измерений, а систематическая – правильность измерения. Различают погрешности абсолютные и относительные.

Абсолютная погрешность – погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины. Например, погрешность измерения массы в 5–0,0001 кг. Она обозначается через Δ .

Относительная погрешность – это безразмерная величина, определяющаяся отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой ФВ, она может выражаться в процентах (%). Например, относительная погрешность измерения массы

$$5_{\text{кг}} - \frac{0,0001}{5} = 0,00002 \text{ или } 0,002 \%. \text{ Иногда берется отношение абсо-}$$

лютной погрешности к максимальному значению ФВ, которое может быть измерено данным СИ (верхний предел шкалы прибора). В этом случае относительная погрешность называется *приведенной*.

Относительная погрешность обозначается через δ и определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} = \frac{X_{\text{изм}} - X_0}{X_0}. \quad (1.7)$$

Поскольку $X_{\text{д}} \approx X_{\text{изм}}$ (или очень мало отличается от него), то на практике обычно принимается

$$\delta = \Delta / X_{\text{изм}}. \quad (1.8)$$

Кроме случайной и систематической погрешностей измерения различают так называемую *грубую погрешность* измерения. Иногда в литературе эту погрешность называют *промахом*. Грубая погрешность результата измерения – это такая погрешность, которая значительно превышает ожидаемую.

Как уже отмечалось, в общем случае проявляются одновременно обе составляющие суммарной погрешности измерения – случайная и систематическая, поэтому

$$\Delta = \Delta^{\circ} + \Theta, \quad (1.9)$$

где Δ – суммарная погрешность измерения, которая может быть представлена в виде $\sum \Delta$; Δ – случайная составляющая погрешности измерения; Θ – систематическая составляющая погрешности измерения.

Виды измерений обычно классифицируются по следующим признакам:

- характеристике точности – равноточные, неравноточные (равнорассеянные, неравнорассеянные);
- числу измерений – однократные, многократные;
- отношению к изменению измеряемой величины – статические, динамические;
- метрологическому назначению – метрологические, технические;
- выражению результата измерений – абсолютные, относительные;
- по общим приемам получения результатов измерений – прямые, косвенные, совместные, совокупные.

Равноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности СИ и в одних и тех же условиях.

Неравноточные измерения – ряд измерений какой-либо величины, выполненных несколькими различными по точности СИ и (или) в разных условиях.

Однократное измерение – измерение, выполненное один раз.

Многократные измерения – измерения одного и того же размера ФВ, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом наблюдений, т. е. состоящих из ряда однократных измерений.

Прямое измерение – измерение ФВ, проводимое прямым методом, при котором искомое значение ФВ получают непосредственно из опытных данных. Прямое измерение проводится путем экспериментального сравнения измеряемой ФВ с мерой этой величины или путем отсчета показаний СИ по шкале или цифровому прибору. (Например, измерения длины, высоты с помощью линейки, напряжения – с помощью вольтметра, массы – с помощью весов.)

Уравнение прямого измерения имеет следующий вид:

$$Q = q[Q]. \quad (1.10)$$

Косвенное измерение – измерение, проводимое косвенным методом, при котором искомое значение ФВ находят на основании результата прямого измерения другой ФВ, функционально связанной с искомой величиной известной зависимостью между этой ФВ и величиной, получаемой прямым измерением.

Уравнение косвенных измерений имеет следующий вид:

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n); \quad Y = F(x), \quad (1.11)$$

где F – известная функция; n – число прямо измеренных ФВ; x_1, x_2, x_i, x_n – значения прямо измеренных ФВ.

Например: определение площади, объема с помощью измерения длины, ширины, высоты; электрической мощности методом измерения силы тока и напряжения и т. д.

Совокупные измерения – одновременно проводимые измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях различных сочетаний этих величин.

Совместные измерения – одновременно проводимые измерения двух или нескольких неоднородных физических величин для определения зависимости между ними.

1.6. Технический контроль

Технический контроль (ТК) – это проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям. Развитие науки и техники, повышение требований к качеству продукции влекут за собой рост затрат на технический контроль. В некоторых промышленных отраслях они составляют до 50 % от себестоимости продукции.

В случае если контроль выполняется по показаниям средств измерения, он называется *контролем показаний*. Например, определение годности изделия по шкальным приборам, у которых часто предусматриваются предельные флажки (планки, метки), между которыми должен находиться параметр годного изделия.

В зависимости от места расположения элементов средства контроля различают местный и дистанционный контроль. *Местный контроль* применяется в случае, если все элементы установлены на рабочих местах, где изготавливается или контролируется изделие. Дистанционный контроль предусматривается в случаях, когда невозможно расположить все элементы в одном месте.

Техническое диагностирование – процесс определения технического состояния объекта диагностирования с определенной точностью (ГОСТ 20911-75). Результатом технического диагностирования является заключение о техническом состоянии объекта с указанием при необходимости места, вида и причин дефекта (дефектов). Например, диагностирование двигателя автомобиля на специальных стендах, когда по показаниям преобразователей, установленных в разных узлах двигателя, дается заключение о функционировании всего двигателя с

указанием отклонений от нормативных величин контролируемых параметров или их действительное значение.

Испытания – это экспериментальное определение количественных и (или) качественных свойств объекта испытаний как результата воздействия на него при его функционировании, при моделировании объекта и (или) воздействия (ГОСТ 16504-81).

Испытания продукции и ее частей занимают важное место в процессе управления качеством продукции на производстве. Развитие системы сертификации продукции, подтверждающей не только показатели ее качества, но и безопасность для окружающей среды, жизни, здоровья потребителя, определяет место испытаниям не только в сфере производства, но и на протяжении всего жизненного цикла изделия, начиная от его проектирования и кончая утилизацией.

Понятия «измерение», «технический контроль», «испытание» являются взаимосвязанными. Так, измерение может быть как частью промежуточного преобразования в процессе контроля или испытания, так и окончательным этапом получения информации при контроле или испытании. В то же время испытание может являться этапом получения информации в процессе контроля.

Технический контроль функционирует как система, основными элементами которой являются объект, средство, метод, вид, исполнитель, условия.

Объект технического контроля – подвергаемая контролю продукция, процессы ее создания, применения, транспортирования, хранения, технического обслуживания и ремонта, а также соответствующая техническая документация. Объектами технического контроля являются предметы труда (например, продукция основного и вспомогательного производства в виде изделий, материалов и т. п.), средства труда (например, оборудование промышленных предприятий: станки, приспособления, приборы и т. п.) и технологические процессы).

Средство технического контроля – техническое устройство, вещество и (или) материал для проведения контроля. В отличие от средства измерения при техническом контроле могут применяться различные вещества или материалы для обеспечения целей контроля.

Метод технического контроля – правила применения определенных принципов и средств контроля. В метод технического контроля входят основные физические, химические, биологические и другие явления и зависимости (законы, принципы), которые применяются для получения первичной информации об объекте контроля. Кроме того, метод контроля при необходимости содержит также определенную последовательность применения этих принципов во время контроля.

Различают методы разрушающего и неразрушающего контроля.

Метод разрушающего контроля – метод, при котором может быть нарушена пригодность объекта к применению (контроль прочности детали, узла).

Метод неразрушающего контроля – метод, при котором не должна быть нарушена пригодность объекта к применению.

Вид технического контроля – классификационная группировка контроля по определенному признаку (например, контроль механических величин, контроль тепловых величин, контроль качественных характеристик, автоматизированный контроль и т. п.).

Условия технического контроля – совокупность воздействующих факторов и (или) режимов функционирования объекта при техническом контроле.

Условия контроля, которые устанавливаются нормативно-технической документацией на данный вид продукции, называются *нормативными условиями*. Например, нормативные условия выполнения линейных и угловых измерений по ГОСТу 8.050-73:

- температура окружающей среды $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- атмосферное давление 101 325 Па (760 мм рт. ст.);
- относительная влажность окружающего воздуха 58 % (нормальное парциальное давление водяных паров 1333 Па);
- ускорение свободного падения (ускорение силы тяжести) – $9,8\text{ м/с}^2$;
- направление линии и плоскости измерения линейных размеров – горизонтальное;
- относительная скорость движения внешней среды равна нулю;
- значения внешних сил, кроме силы тяжести, атмосферного давления, действия магнитного поля Земли и сил сцепления элементов измерительной системы (установки), равны нулю.

2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ

2.1. Классификация средств измерений

В метрологии средства измерений принято классифицировать по виду, принципу действия и метрологическому назначению.

Классификация средств измерения и контроля по типу контролируемых физических величин представлена на рис. 2.1, а по виду контролируемых физических величин – на рис. 2.2 [16].



Рис. 2.1. Классификация средств измерения и контроля по типу физических величин



Рис. 2.2. Классификация средств измерения и контроля по виду измеряемых геометрических величин

Универсальные измерительные инструменты и приборы нашли широкое применение в условиях единичного и мелкосерийного производства, а также для определения численных величин и отклонений, отклонений от правильной геометрической формы и взаимного расположения поверхностей (при отсутствии специальных приспособлений), при наладке станков, при особо ответственных измерениях во всех видах производств.

Классификация универсальных измерительных инструментов и приборов приведена на рис. 2.3 и 2.4 [16].

В условиях расширяющейся автоматизации технологических процессов обработки деталей и сборки узлов и агрегатов машин, повышения требований к производительности, точности и качеству обработки при массовом производстве машин все большее значение приобретают автоматические средства контроля. Они классифицируются по числу проверяемых параметров, степени автоматизации, способу преобразования измерительного импульса, месту установки в технологическом процессе, воздействию на технологический процесс.

Кроме классификации технического контроля по степени участия оператора в контрольных операциях виды контроля различают по распределению во времени (непрерывный, периодический, летучий), по стадиям технологического процесса (входной, операционный, приемочный), по способу отбора объекта контроля (сплошной, выборочный), по исполнителям (контроль на рабочем месте оператором, контроль мастера, контроль ОТК, инспекционный).

Для создания и изучения измерительных систем, отдельных средств измерений часто применяют так называемые общие структурные схемы средств измерения и контроля. В этих схемах изображены отдельные элементы средств измерения в виде символических блоков, соединенных между собой сигналами, характеризующими физические величины.

ГОСТ определяет следующие общие структурные элементы средств измерения: чувствительный, преобразовательный элементы, измерительную цепь, измерительный механизм, отсчетное устройство, шкалу, указатель, регистрирующее устройство.

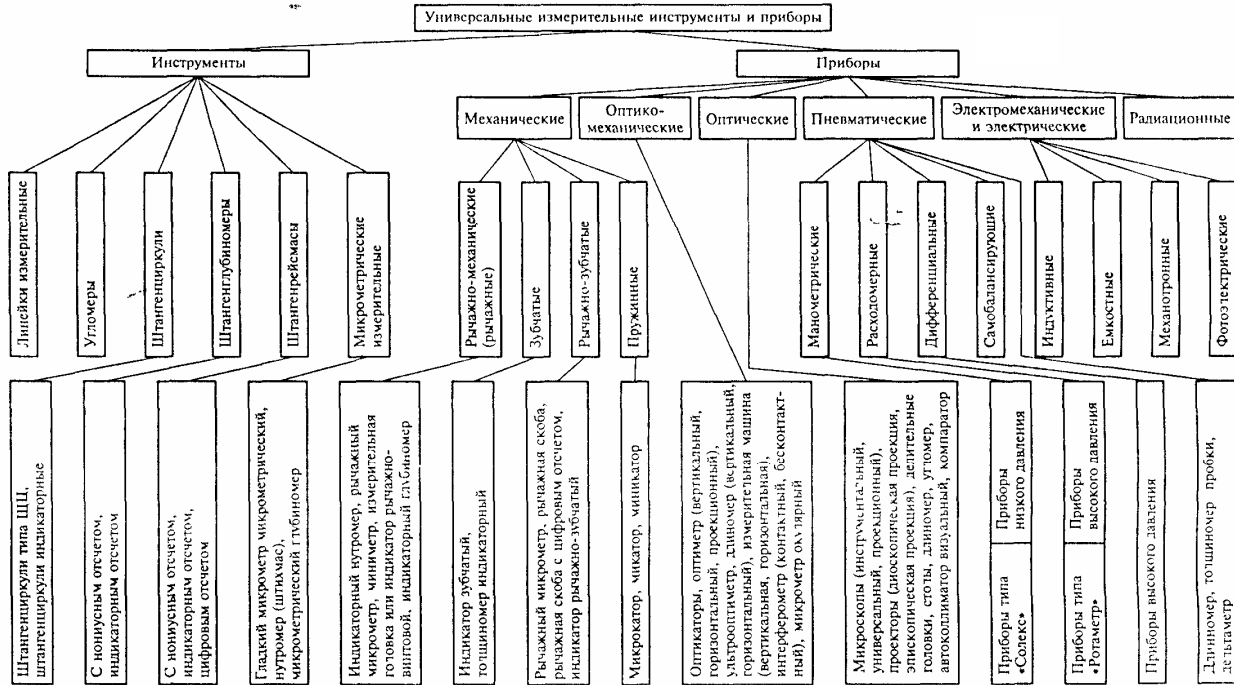


Рис. 2.3. Классификация универсальных измерительных инструментов и приборов

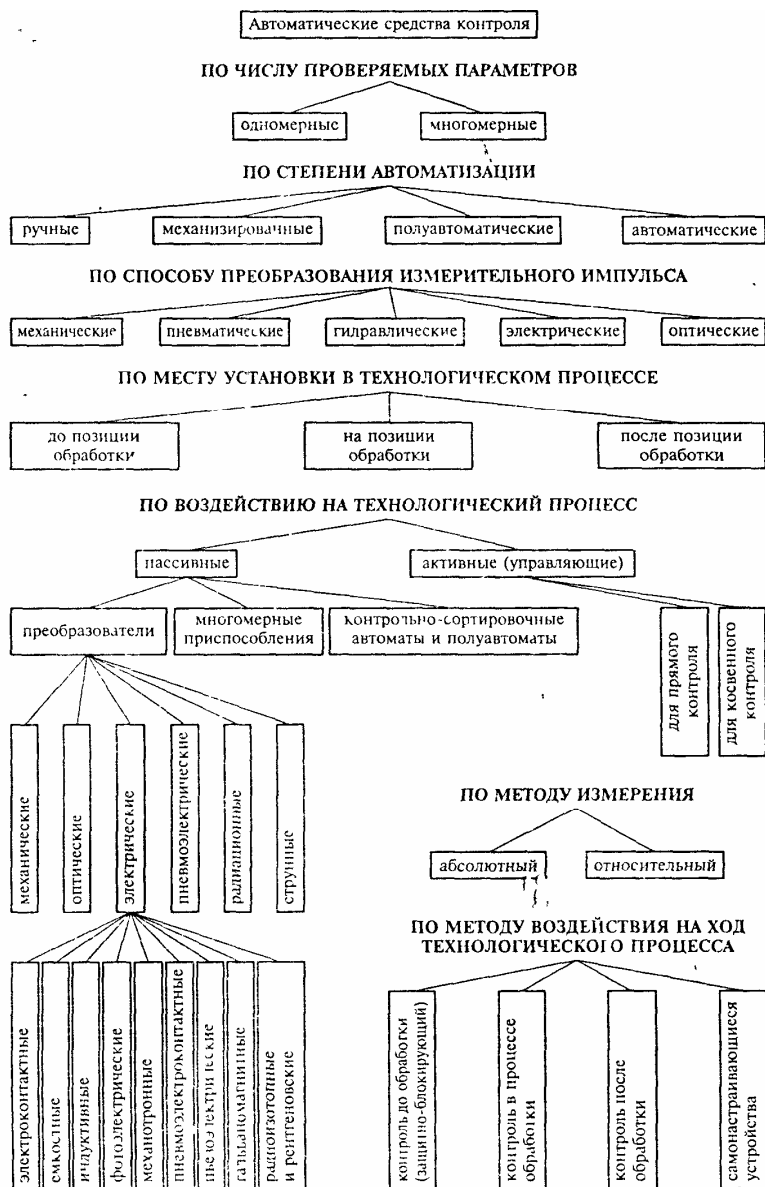


Рис. 2.4. Классификация автоматических средств контроля

2.2. Структурные схемы измерительных устройств

Для удобства анализа различных соединений измерительных устройств между собой и со средствами автоматического управления любые измерительные устройства принято рассматривать как некоторый преобразователь, служащий для преобразования входного сигнала X в выходной Y .

Такое представление измерительных устройств позволяет применять при анализе систем аппарат теории автоматического регулирования.

Измерительные устройства состоят из некоторого числа элементов, предназначенных для выполнения определенных функций, таких как: преобразование поступающего сигнала по форме или виду энергии, защита от помех, представление информации и др. К элементам измерительных устройств относятся: опоры, направляющие, пружины, магниты, контакты и т. п.

Основными составными частями измерительных устройств являются:

- преобразовательный элемент – элемент средства измерений, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований величины;
- *измерительная цепь* – совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации;
- *чувствительный* элемент – первый в измерительной цепи преобразовательный элемент, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой величины;
- *измерительный механизм* – часть конструкции средств измерений, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение;
- *отсчетное устройство* – часть конструкции средства измерений, предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины;
- *регистрирующее устройство* – часть регистрирующего измерительного прибора, предназначенная для регистрации показаний.

На рис. 2.5 приведены структурные схемы измерительных устройств прямого действия (рис. 2.5, а, в) и сравнения (рис. 2.5, б, г). Первые часто называют *измерительными устройствами прямого преобразования*, а вторые – *измерительными устройствами уравнивающего, или компенсационного преобразования*.

Структурная схема измерительных устройств однозначно определяется используемым методом преобразования.

Измерительный прибор, основанный на методе прямого преобразования (рис. 2.5, а), работает следующим образом. Измеряемая физическая величина X поступает в чувствительный элемент 1, где преобразуется в другую физическую величину, удобную для дальнейшего использования (например, ток, напряжение, давление, перемещение, сила), и поступает на промежуточный преобразовательный элемент 2, который обычно либо усиливает поступающий сигнал, либо преобразует его по форме. (В частном случае элемент 2 может отсутствовать.) Выходной сигнал элемента 2 поступает к измерительному механизму 3, перемещение элементов которого определяется с помощью отсчетного устройства 4. Выходной сигнал Y (показание), формируемый измерительным прибором, может быть воспринят органами чувств человека.

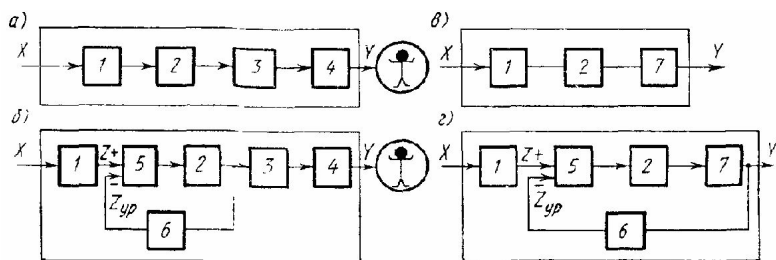


Рис. 2.5. Структурные схемы измерительных устройств

Показанием называют значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины. Отсчетное устройство представляет собой цифровое табло или в подавляющем большинстве случаев шкалу с указателем. Для шкальных отсчетных устройств принято использовать ряд понятий, сущность большинства из которых легко установить по рис. 2.6.

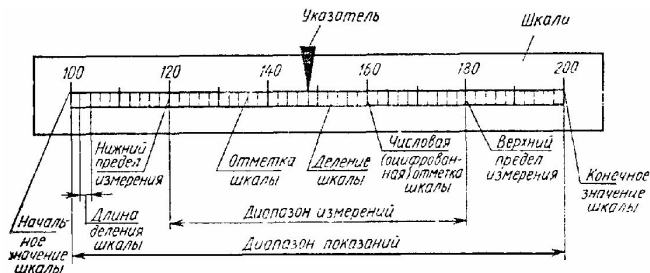


Рис. 2.6. Схема отсчетного устройства измерительного прибора

2.3. Статические характеристики измерительных устройств

В общем случае режим работы измерительного устройства, при котором значения входного X и выходного Y сигналов не изменяются, называют статическим, стационарным или равновесным.

Статической характеристикой измерительного устройства называют функциональную зависимость выходного сигнала от входного в статическом режиме работы указанного устройства. Более точно статическую характеристику можно определить как зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра его входного сигнала в статическом режиме. Статическая характеристика описывается в общем случае некоторым нелинейным уравнением (уравнением преобразования):

$$Y = f(X). \quad (2.1)$$

Для измерительных преобразователей, а также измерительных приборов с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц измеряемой величины, статическую характеристику принято называть *функцией преобразования*. Для измерительных приборов иногда статическую характеристику называют *характеристикой шкалы*.

Определение статической характеристики связано с выполнением градуировки, поэтому для всех средств измерений используют понятие *градуировочной характеристики*, под которым понимают зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленную в виде таблицы, графика или формулы.

На рис. 2.7 показаны виды статических характеристик измерительных устройств. За исключением специальных случаев, основное требование, предъявляемое к статической характеристике измерительных устройств, сводится к получению линейной зависимости между выходной и входной величинами. На практике это требование реализуется в общем случае только с некоторой принятой заранее погрешностью.

Кроме статистической характеристики для определения метрологических свойств измерительных устройств используется ряд параметров.

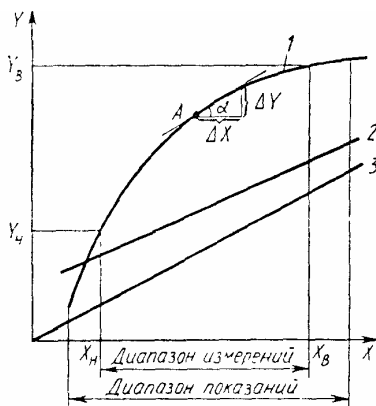


Рис. 2.7. Статическая характеристика измерительного устройства

Диапазон показаний — область значений шкалы, ограничения конечным и начальным значениями шкалы.

Диапазон измерений (рабочая часть шкалы) — область значений измеряемой величины на шкале прибора, для которой нормированы допускаемые погрешности средств измерений.

Применительно к измерительным устройствам диапазон измерений часто называют *рабочим диапазоном преобразований*.

Для количественной оценки влияния на выходной сигнал измерительного устройства входного сигнала в произвольной точке (рис. 2.7) статистической характеристики служит предел отношения приращения ΔY выходного сигнала к приращению ΔX входного сигнала, когда последнее стремится к нулю, т. е. производная в выбранной точке

$$S = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}. \quad (2.2)$$

Применительно к измерительным приборам этот параметр называют *чувствительностью* и определяют как отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Графически она определяется тангенсом угла наклона α касательной (рис. 2.7), проведенной к выбранной точке A статической характеристики.

Если статическая характеристика измерительного прибора нелинейна (кривая 1 на рис. 2.7), то его чувствительность будет различной в разных точках характеристики, а шкала прибора – неравномерной. Приборы с линейной (прямая 2 на рис. 2.7) или пропорциональной (прямая 3 на рис. 2.7) статической характеристикой имеют неизменную в любой точке шкалы чувствительность и равномерную шкалу.

У измерительных преобразователей статическая характеристика, как правило, является линейной:

$$Y = KX. \quad (2.3)$$

Здесь K – *коэффициент преобразования* (или при использовании преобразователя в системах автоматического регулирования – *коэффициент передачи*), определяемый как отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отражающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя.

Для измерительных приборов важным параметром является *цена деления*, определяемая как разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Физически цена деления определяется количеством единиц входной величины, содержащихся в одном делении шкалы измерительного прибора.

Цена деления однозначно связана с числом делений n шкалы измерительного прибора. Последнее в свою очередь связано с погрешностью измерительного прибора, обычно представляемой его классом точности Λ . Число делений шкалы измерительного прибора, как правило, в первом приближении определяется из соотношения

$$n \geq 10 / (2\Lambda). \quad (2.4)$$

При выполнении условия (2.4) число делений шкалы выбирают таким, чтобы цена деления составляла целое число единиц измеряемой величины.

В научно-технической литературе используется понятие *порога чувствительности* (*порога реагирования*) измерительного устройства, под которым понимают то наименьшее изменение входного сигнала, которое вызывает уверенно фиксируемое изменение выходного сигнала.

Как правило, наблюдатель, осуществляющий измерение, уверенно может заметить смещение стрелки на половину деления шкалы, поэтому порог чувствительности можно считать равным половине цены деления, а если учесть при этом соотношение (2.4), то в первом приближении порог чувствительности равен классу точности Λ .

2.4. Динамические характеристики измерительных устройств

Режим работы измерительного устройства, при котором значения выходного и входного сигналов изменяются во времени, называют *динамическим (нестационарным или неравновесным)*.

Практически все измерительные устройства имеют в своем составе инерционные элементы, а именно: подвижные механические узлы, электрические или пневматические емкости, индуктивности. Элементы, обладающие тепловой инерцией и т. п. Наличие инерционных элементов определяет инерционность всего измерительного устройства, т. е. приводит к тому, что в динамическом режиме мгновенное значение выходного сигнала измерительного устройства зависит не только от мгновенного значения входного сигнала, но и от любых изменений этого сигнала, т. е. от его первой и второй производных и производных более высокого порядка.

Указанные инерционные свойства измерительных устройств определяют динамической характеристикой.

Динамическая характеристика измерительного устройства в общем случае это зависимость между информативными параметрами выходного и входного сигналов и временем или зависимостью выходного сигнала от входного в динамическом режиме.

Для всех измерительных устройств важным является время установления выходного сигнала или показаний T_n , которой также называют временем реакции. Оно определяет собой отрезок времени, необходимый для завершения переходного процесса при скачкообразном изменении входного сигнала.

Так как в основном все рассмотренные переходные процессы теоретически заканчиваются только при бесконечном значении времени, то за время реакции T_n обычно принимают время, за которое выходной сигнал измерительного устройства, приближаясь к установившемуся значению, входит в некоторую зону, отличающуюся от этого значения на $\pm 5\%$ от изменения выходного сигнала, соответствующего данному скачкообразному входному сигналу.

Значение времени реакции может быть приближенно определено через постоянную времени измерительного устройства из соотношения

$$T_{\Pi} = (3 \div 5) T. \quad (2.5)$$

2.5. Погрешности измерительных устройств

Инструментивная погрешность, или погрешность измерительных устройств имеет определяющее значение для наиболее распространенных технических измерений.

На рис. 2.8 приведена классификация погрешностей измерительных устройств по ряду признаков [21].



Рис. 2.8. Классификация погрешностей измерительных устройств

По характеру проявления при повторных измерениях одного и того же значения физической величины принято выделять систематическую и случайную погрешности (или составляющие погрешности) измерительных устройств. В эти понятия в основном вкладывается тот же смысл, что и в понятия систематической и случайной погрешностей измерений. Особенность здесь состоит в том, что всякое измерительное устройство предназначается для внесения определенности в исследуемый процесс, а наличие случайной составляющей погрешности приводит к неоднозначности. В связи с этим первая задача, которая обычно решается при создании измерительных устройств, состоит в том, чтобы случайную погрешность сделать незначительной. Если это условие выполняется, а элементы, входящие в состав измерительного устройства, стабильны, можно путем градуировки обеспечить систематические погрешности измерительного устройства. Рассмотренная концепция используется как основная при создании рабочих средств измерений и, в частности, измерительных устройств для технологических измерений.

В зависимости от условий применения измерительных устройств различают основную и дополнительную погрешности.

Основной погрешностью средства измерений называют погрешность при использовании его в нормальных условиях. Нормальными условиями применения средств измерений называют условия, при которых влияющие величины имеют номинальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. Нормальные условия применения указываются в стандартах или технических условиях на средства измерений. При использовании средств измерений в нормальных условиях считают, что влияющие на них величины практически никак не изменяют их характеристики.

Дополнительной погрешностью измерительного преобразователя (или *изменением показаний измерительного прибора*) называют изменение его погрешности, вызванной отклонением одной из влияющих величин от ее нормативного значения или выходом ее за пределы нормальной области значений. Дополнительная погрешность может быть вызвана изменением сразу нескольких влияющих величин.

Изменение погрешности, как и других характеристик и параметров измерительных устройств под действием влияющих величин, описываются функциями влияния.

Иными словами, дополнительная погрешность – это часть погрешности, которая добавляется (имеется в виду алгебраическое сложение) к основной в случаях, когда измерительное устройство применяется в рабочих условиях. *Рабочие условия* обычно таковы, что изменения значений влияющих величин для них существенно больше, чем для нормальных условий, т. е. область рабочих (часть этой области называют расширенной областью) условий включает в себя область нормальных условий.

В некоторых случаях основная погрешность измерительных устройств определяется для рабочей области изменения значений влияющих величин. В этих случаях понятие дополнительной погрешности теряет смысл.

В зависимости от режима применения различают *статическую* и *динамическую погрешности* измерительных устройств.

По форме представления принято различать абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерительных устройств. Для измерительных приборов и преобразователей определение этих погрешностей специфично. У измерительных приборов имеется шка-

ла, отградуированная в единицах входной величины, либо шкала, отградуированная в условных единицах с известным множителем шкалы, поэтому результат измерения представляется в единицах входной величины. Это обуславливает простоту определения погрешности измерительных приборов.

Абсолютной погрешностью измерительного прибора Δ называют разность показаний прибора X_n и истинного (действительного) X_d значения измеряемой величины:

$$\Delta = X_n - X_d \quad (2.6)$$

Действительное значение определяется с помощью образцового прибора или воспроизводится мерой.

Погрешности средств измерения нормируют установлением предела допускаемой погрешности. *Предел допускаемой погрешности средства измерения* – наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерения, при которой оно может быть признано и допущено к применению. Например, пределы допускаемой погрешности 100 мм концевой меры длины класса 1 составляют ± 50 мкм, а для амперметра класса 1,0 – $\pm 1\%$ от верхнего предела измерений.

Погрешности средств измерения могут выражаться:

в виде абсолютной погрешности Δ :

для меры

$$\Delta = X_n - X_d, \quad (2.7)$$

где X_n – номинальное значение; X_d – действительное значение измеряемой величины;

для прибора

$$\Delta = X_n - X_d, \quad (2.8)$$

где X_n – показание прибора;

в виде относительной погрешности (100 %):

$$\delta = (\Delta/X_d)100, \quad (2.9)$$

в виде приведенной погрешности (100 %):

$$\gamma = (\Delta/X_N)100, \quad (2.10)$$

где X_N – нормирующее значение измеряемой физической величины.

В качестве нормирующего значения может быть принят предел измерения данным СИ. Например, для весов с пределом измерения массы 10 кг $X_N = 10$ кг.

Если в качестве нормирующей величины принимается размах в шкалы, то именно к значению этого размаха в единицах измеряемой

физической величины и относят абсолютную погрешность. Например, для амперметра с пределами $-100 \dots +100$ мА $X_N = 200$ мА.

Если в качестве нормирующей величины принимается длина шкалы прибора, равная единице, то $X_N = 1$.

На каждое СИ погрешность приводится только в какой-то одной форме.

Если погрешность СИ при неизменных внешних условиях постоянна во всем диапазоне измерений, то

$$\Delta = \pm a. \quad (2.11)$$

Если она меняется в указанном диапазоне, то

$$\Delta = \pm(a + bx). \quad (2.12)$$

При $\Delta = \pm a$ погрешность называется *аддитивной*, а при $\Delta = \pm(a + bx)$ – *мультипликативной*.

Для аддитивной погрешности

$$\delta = \pm p. \quad (2.13)$$

Для мультипликативной погрешности

$$\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_n}{X_n} \right) - 1 \right]. \quad (2.14)$$

Приведенная погрешность:

$$\gamma = \pm q. \quad (2.15)$$

Значения p , c , d , q выбираются из ряда чисел: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $1,6 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $3 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$, где n – положительное или отрицательное целое число, включая нуль.

Для обобщенной характеристики точности средств измерения, определяемой пределами допускаемых погрешностей (основной и дополнительной), а также другими их свойствами, влияющими на погрешность измерений, вводится понятие «класс точности средств измерения». Единые правила установления пределов допускаемых погрешностей показаний по классам точности средств измерения регламентирует ГОСТ 8.401–80. Классы точности удобны для сравнительной оценки качества средств измерения, их выбора, международной торговли.

Классы точности определяются стандартами и техническими условиями, содержащими технические требования к средствам измерения. Для каждого класса точности средства измерения конкретного типа устанавливаются конкретные требования к метрологическим ха-

рактикостикам, в совокупности отражающие уровень точности. Единые характеристики для средств измерения всех классов точности (например, входные и выходные сопротивления) нормируются независимо от класса точности. Средства измерения нескольких физических величин или с несколькими диапазонами измерений могут иметь два и более классов точности. Например, электроизмерительному прибору, предназначенному для измерения электрического напряжения и сопротивления, могут быть присвоены два класса точности: один – как вольтметру, другой – как амперметру.

Классы точности присваивают средствам измерения при разработке. В процессе эксплуатации метрологические характеристики средств измерения ухудшаются. Поэтому допускается понижение класса их точности по результатам метрологической аттестации.

В связи с большим разнообразием средств измерения и их метрологических характеристик ГОСТ 8.401–80 определены способы обозначения, причем выбор того или иного способа зависит от того, в каком виде нормирована погрешность. Для СИ, у которых погрешность измерения определяется в соответствии с формулами (2.11) и (2.12), класс точности присваивается порядковым номером, начиная для самого точного с 1 и далее по мере возрастания погрешности.

Если погрешность определяется по формулам (2.13) или (2.11), класс точности СИ соответствует значениям относительной или приведенной погрешности, выраженной в %.

Например, если $\delta = \pm 1 \%$, то класс точности СИ – 0,1; если приведенная погрешность $\gamma = \pm 1,5 \%$, то класс точности СИ – 1,5. Это справедливо для приведенной погрешности, нормируемой значением физической величины в принятых единицах. В тех случаях, когда погрешность нормируется длиной шкалы прибора 1, класс точности также равен численному значению γ , но обозначается по-другому. Например, при $\gamma = 0,5 \%$ ($X_N = 1$) класс точности 0,5.

Примеры обозначения классов точности приборов см. в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Примеры обозначения класса точности приборов

Формула для определения пределов допускаемых погрешностей	Примеры пределов допускаемой погрешности, %	Обозначение класса точности		Примечание
		в документации	на средствах измерения	
$\Delta = \pm a$	-	Класс точности М	М	-
$\Delta = \pm(a + bx)$	-	Класс точности С	С	-
$\gamma = (\Delta/X_N) \pm p$	$\gamma = \pm 1,5$ $\gamma = \pm 0,5$	Класс точности 1,5	1,5	Если X_N выражено в единицах величины
	-	Класс точности 0,5	0,5 V	Если X_N определяется длиной шкалы (ее части)
$\delta = (\Delta/X) \pm q$	$\delta = \pm 0,5$	Класс точности 0,5	0,5	-
$\delta = \pm [c + d \times (X_n/X - 1)]$	$\delta = \pm [0,02 + 0,01 \times (X_n/X - 1)]$	Класс точности 0,02/0,01	0,02/0,01	-

Примечания: Δ – пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения, выраженной в единицах измеряемой величины на входе (выходе) или условно в делениях шкалы; X – значение измеряемой величины на входе (выходе) средства измерения или число делений, отсчитываемых по шкале; a, b – положительные числа, не зависящие от X ; δ – пределы допускаемой относительной основной погрешности, %; q, p – больший (по модулю) из пределов измерений; c, d – положительные числа, выбираемые из ряда $c = b + d$; $d = a|X_k|$; γ – пределы допускаемой приведенной основной погрешности, %; X_N – нормирующее значение измеряемой величины.

В зависимости от точности все средства измерения делят на эталоны, образцовые и рабочие. По эталонам и исходным образцовым средствам измерения проводят поверку или калибровку метрологических характеристик средств измерений более низших классов точности – подчиненных образцовых и рабочих средств измерения.

Схема передачи размеров (метрологическая цепь), от эталонов к рабочим средствам измерений выглядит следующим образом: первичный эталон $\Rightarrow$ рабочий эталон $\Rightarrow$ образцовое средство измерения порядка $\Rightarrow$ рабочие средства измерения.

3. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ МАССОВЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

3.1. Весоизмерительные и весодозирующие устройства

Измерение и контроль массовых весовых величин занимает существенное место в общей структуре измерений. В настоящее время номенклатура весоизмерительных устройств превышает тысячу наименований, основное число которых предназначено для механизации и автоматизации технологических процессов. Они представляют собой сложнейшие механизмы, оснащенные автоматическими устройствами контроля массы, регистрирующими, дозирующими и другими специфическими элементами.

По назначению весоизмерительные и весодозирующие устройства можно разделить на следующие шесть групп:

- 1) весы дискретного действия;
- 2) весы непрерывного действия;
- 3) дозаторы дискретного действия;
- 4) дозаторы непрерывного действия;
- 5) образцовые весы, гири, передвижные средства поверки;
- 6) устройства для специальных измерений.

Классификация весоизмерительных и весодозирующих устройств представлена на рис. 3.1[16].

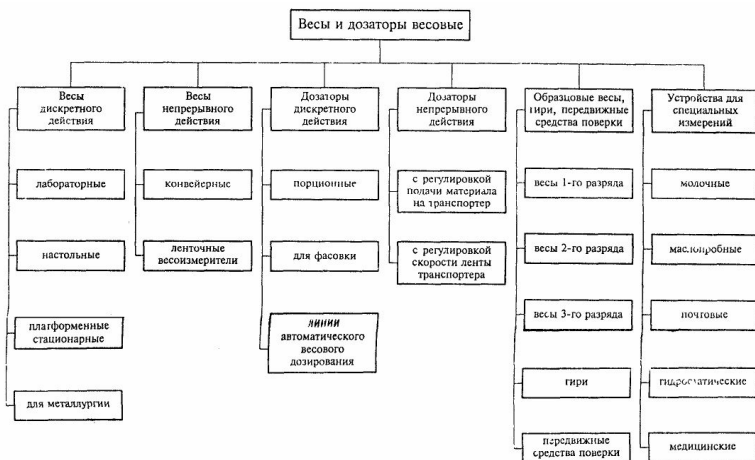


Рис. 3.1. Классификация весоизмерительных и весодозирующих устройств

К первой группе относятся:

- лабораторные весы различных типов с особыми условиями и методами взвешивания, требующие высокой точности показаний;
- весы настольные с наибольшим пределом взвешивания до 100 кг, используемые главным образом в торговле;
- весы платформенные передвижные и врезные – до 15 т;
- весы платформенные стационарные, автомобильные, вагонные (в т. ч. и для взвешивания на ходу);
- весы для металлургической промышленности (к ним относятся системы шихтоподачи для доменных печей, весы для жидкого металла, слитков, проката и т. п.).

Весы первой группы изготавливают с коромыслами шкального типа, циферблатными квадрантными указателями, цифропоказывающими и печатающими указательными приборами и пультами.

В зависимости от принципа действия весы подразделяют на механические, электромеханические, оптико-механические и радиоизотопные (рис. 3.2) [16].

Наиболее широко распространены *весы рычажные*. Они основаны на принципе сравнения масс, и их показания не зависят от местного ускорения свободного падения. Сравнение масс производится при помощи рычагов (рычажной системы) и чашек весов.

Основные метрологические характеристики механических рычажных весов, их преимущества, недостатки и область применения приведены в табл. 3.1.

Ко второй группе относятся:

- конвейерные весы;
- ленточные весы непрерывного действия, ведущие непрерывный учет массы транспортируемого материала.

К третьей группе относятся:

- дозаторы для суммарного учета (порционные весы);
- дозаторы для фасовки сыпучих материалов;
- линии (автоматического весового дозирования для производства бетона, асфальтобетона, стекольной шихты и т. д.).

К четвертой группе относятся:

- дозаторы с регулировкой подачи материала на транспортер;
- дозаторы с регулировкой скорости ленты транспортера.

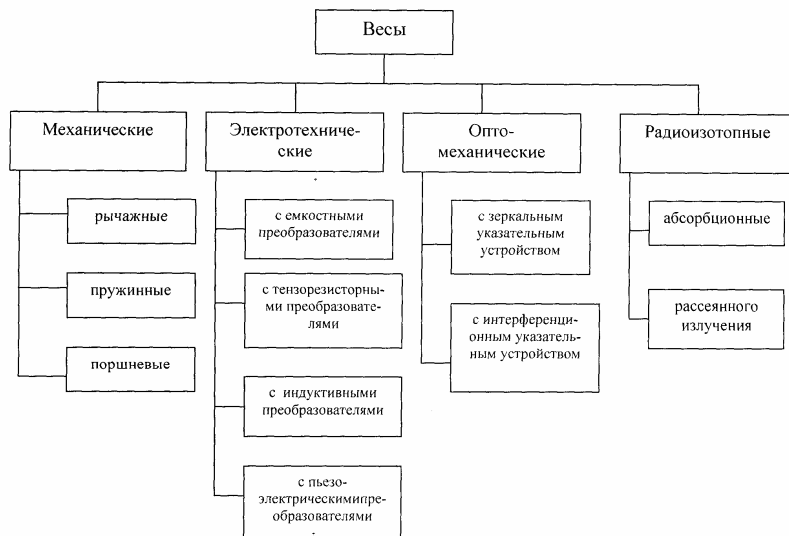


Рис. 3.2. Классификация весов по принципу действия

К пятой группе относятся различные метрологические весы для проведения поверочных работ, а также гири и передвижные средства поверки. К конструкции весов этой группы предъявляют специфические требования, присущие выполнению поверочных работ.

К шестой группе относятся различные весоизмерительные устройства, служащие для определения не массы, а других параметров (например, подсчета или группирования равновесных деталей или изделий, определения крутящего момента двигателей и т. д.).

Особое место занимают способы взвешивания с применением в качестве силоизмерителя, тензорезисторных и вибростержневых преобразователей. Применение этих преобразователей во многих случаях позволяет избежать от недостатков рычажных систем и, следовательно, повысить точность измерения, снизить металлоемкость весов, сократить время взвешивания. Получение выходных электрических сигналов предопределяет автоматизацию процесса взвешивания, позволяет ввести этот процесс в автоматизированную систему управления. Применение встроенных тензорезисторных преобразователей в различные подъемные и транспортирующие устройства позволяет сократить производственный цикл путем совмещения операций подъема (перемещения) и взвешивания.

Таблица 3.1

Основные метрологические характеристики механических
рычажных весов

Типы весов	Пределы измерения, кг	Погрешность измерения, %	Время успокоения, с	Преимущества	Недостатки	Виды весов
Коромысловые равноплечие	$10^{-8} \dots 10^3$	$\pm 0,1$	5...10	Очень точные, точность показаний не зависит от места измерения	МНОГО механически изнашивающихся деталей,	Аналитические, почтовые, микровесы, прецизионные бытовые
Гирные	$10^{-6} \dots 10^3$	$\pm 0,1$	30... 60		ручное обслуживание, не возможна непо-	Платформенные, бункерные, автомобильные, вагонные, крановые
Коромысловые с передвижными гирями	$10^{-4} \dots 10^6$	$\pm 0,5$	30... 60	Меньшая точность, большее удобство обслуживания по сравнению с коромысловыми равноплечими весами	средственная дисканционная передача результатов измерений	Сортировочные, настольные, быстродействующие, почтовые
Квадрантные	$10^{-3} \dots 10^4$	$\pm 0,5$	2... 5			
Весовые дозаторы	$10^1 \dots 10^2$	$\pm 0,5$	0,1	Возможна автоматизация взвешивания	Не пригодны для дозирования малых масс	Фасовочные

3.2. Гири общего и специального назначения

Однозначной мерой, воспроизводящей единицу массы, является гиря. Государственным первичным эталоном единицы массы является копия № 12 Международного прототипа килограмма, хранимого в Международном бюро мер и весов в Париже.

Государственный первичный эталон единицы массы предназначен для воспроизведения, хранения и передачи размера единицы массы вторичным эталонам.

Рабочие эталоны массы изготавливают в виде отдельных гирь и в виде гирь от 1 мг до 10 кг. В качестве материала для гирь служат платина, золото, никель, бронза или кварц.

В зависимости от назначения гири подразделяют на гири общего назначения, образцовые, условные, а также встраиваемые в рычажные механизмы различных типов весов.

Гири общего назначения массой от 1 мг до 20 кг изготавливают в соответствии с ГОСТом 7328–73. Гири выпускают пяти классов, отличающихся точностью воспроизведения значения массы.

Гири 1-го класса точности применяются для взвешиваний высшей точности при микрохимических, химических и других анализах. Предельные значения массы гирь этого класса от 1 мг до 1 кг.

Гири 2-го класса точности применяются для взвешивания высокой точности при химических и других анализах. Изготавливают гири в пределах от 1 мг до 20 кг.

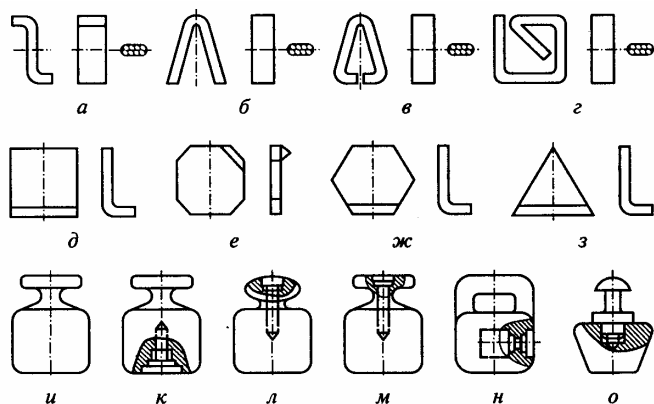


Рис. 3.3. Формы гирь общего назначения

Область применения гирь 3-го класса точности – технические анализы повышенной точности и взвешивание драгоценных металлов. Номинальная масса набора гирь – от 1 мг 20 кг.

Область применения гирь 4-го класса точности – технические анализы и взвешивание медикаментов. Номинальная масса гирь предусматривается в пределах от 5 мг до 20 кг.

Гири 5-го класса точности применяются для взвешивания в торговле и в хозяйстве. Набор номинальных масс предусматривает изменение гирь от 10 г до 10 кг.

Материал гирь общего назначения выбирается в зависимости от номинальной массы и класса гирь (титан и его сплавы, коррозионно-стойкая сталь аустенитного класса (немагнитная), алюминий, углеродистая сталь, чугун). Так, гири 1-го класса точности, изображенные на рис. 3.3, *а, б, в, г*, изготавливают из титана и его сплавов. Гири 4-го класса точности для форм, представленных на рис. 3.3, *д, е, ж, з*, изготавливают из алюминия, для форм, представленных на рис. 3.3, *и, к, л, м*, – из углеродистой стали, для форм, представленных на рис. 3.3, *н, о*, – из чугуна.

Допускаемые отклонения массы гирь, находящихся в применении и погрешности определения массы гирь всех классов, предусмотрены ГОСТ. Граммовые и килограммовые гири, кроме форм, изображенных на рис. 4.1 *а и е*, изготавливают с подгоночной полостью.

Подгонка гирь по массе выполняется либо по подгоночной полости, либо за счет хромового или никелевого покрытия по всей поверхности гири.

Согласно ГОСТ гири могут выпускаться поштучно, отдельными наборами или комплектами, составленными из наборов.

Условное обозначение гирь и наборов состоит из букв, обозначающих единицу измерений (кг – килограмм, г – грамм, мг – миллиграмм) и чисел. Первое число после буквы обозначает класс гири (набора), второе – массу гири или суммарную массу гирь в наборе, третье (в наборах миллиграммовых гирь) – массу наименьшей гири. Например: «Гиря КГ– 4–5 ГОСТ 7 328–73» — килограммовая гиря 4-го класса точности массой 5 кг;

«Набор КГ– 3–20 ГОСТ 7328–73» – набор килограммовых гирь 3-го класса точности массой 20 кг;

«Набор МГ– 2 – 1100–1 ГОСТ 7328–73» – набор миллиграммовых гирь 2-го класса точности массой 1100 мг с наименьшей гирей массой 1 мг.

К гирям специального назначения относятся образцовые гири, условные гири, гири, встроенные в весы и т. п.

Образцовые гири служат для поверки гирь и весов. ГОСТ устанавливает четыре разряда образцовых гирь (1, 2, 3, 4) и область их применения. Так, гири 3-го разряда применяют при поверке образцо-

вых гирь 4-го разряда массой от 10 до 2000 мг, поверке гирь 4-го класса точности и поверке образцовых грузопоршневых и квадрантных весов. Гири 4-го разряда используют при поверке гирь 5-го класса точности, поверке условных гирь, безменов, весов настольных и конвейерных, циферблатных равноплечих и неравнорычаговых автомобильных, пружинных динамометров и др.

Форма, основные размеры и материал образцовых гирь определяются ГОСТ. Некоторые формы образцовых гирь представлены на рис. 3.4.

Условные гири предназначены для комплектации платформенных рычажных гириных весов общего назначения с отношением плеч рычажной системы 1:100.

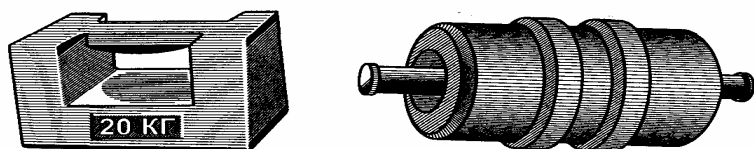


Рис. 3.4. Формы образцовых гирь



Рис. 3.5. Формы условных гирь

Условные гири (рис. 3.5) выпускаются с массой от 1 до 500 кг. Гири изготавливают из серого чугуна. Внутри гирь предусматриваются подгоночные полости таких размеров, чтобы при ремонте гирь можно было досыпать тарировочный материал в количестве не менее 0,8 % от номинальной массы гири. Тарировочным материалом служит чугунная дробь или стружка черных металлов. На верхней поверхности гирь указывается условная масса гири в килограммах и отношение номинальной массы к условной в цифровом выражении. Например: условная масса гири 500 кг, номинальная масса 5 кг, отношение 1:100. Условное обозначение комплекта гирь содержит: слово «гири», буквы «ГУ», обозначающие, что гири имеют условную массу, номер ком-

плекта и обозначение технических условий, по которым изготавливается и поставляется набор.

3.3. Измерение и контроль геометрических величин

В практике изготовления и эксплуатации технологических машин особую роль играет измерение геометрических величин.

Для измерения геометрических величин используются различные инструменты.

Меры длины концевые плоскопараллельные предназначены для передачи размеров от эталона до изделия. Это основное назначение концевых мер длины осуществляется путем применения их для хранения и передачи единицы длины, поверки и градуировки различных мер и средств измерений, поверки калибров, а также для определения размеров изделий и приспособлений, точных разметочных и координатно-расточных работ наладки станков и инструментов.

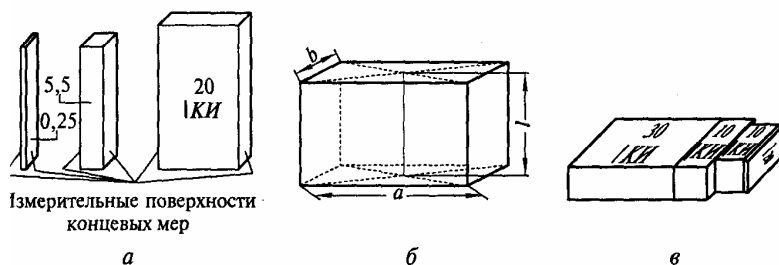


Рис. 3.6. Плоскопараллельные концевые меры длины

Концевые меры длины имеют форму прямоугольного параллелепипеда с двумя плоскими взаимно параллельными измерительными поверхностями (рис. 3.6, а).

За размер плоскопараллельной концевой меры длины принимается ее срединная длина, (рис. 3.6, б), которая определяется длиной перпендикуляра, проведенного из середины одной из измерительных поверхностей меры на противоположную измерительную поверхность. Значения сторон a и b в сечении мер определяются в зависимости от номинального размера

Номинальный размер срединной длины наносится на каждой мере.

Концевые меры изготавливаются следующих классов точности:

00; 01; 0; 1; 2; 3 – из стали; 00; 0; 1; 2 и 3 – из твердого сплава.

(Класс 00 – самый точный.)

Концевые меры комплектуют в различные наборы по их числу и размерам номинальной длины. Номинальные размеры и градация размеров мер длины, а также комплектация их в наборы осуществляются таким образом, чтобы можно было из минимального числа мер составить блок любого размера до третьего десятичного знака.

Класс точности набора определяется низшим классом отдельной меры, входящей в набор. К каждому набору прилагается паспорт, в котором указываются номинальная длина каждой меры и отклонение.

Одно из основных свойств концевых мер длины, обеспечивающее их широкое применение, – это притираемость, т. е. способность прочно сцепляться между собой при прикладывании или надвигании одной меры на другую (рис. 3.6, в). Блок заданного размера необходимо составлять из возможно меньшего числа мер. Вначале следует выбирать концевые меры, позволяющие получить тысячные доли миллиметра, затем сотые, десятые и, наконец, целые миллиметры. Например, для получения блока размером 28,495 мм необходимо из набора взять концевые меры в следующей последовательности: $1,005 + 1,49 + 6 + 20 = 28,495$ мм. Минимальное число концевых мер в блоке, с одной стороны, повысит точность блока (уменьшается суммарная погрешность размера блока), а с другой – надежность блока от разрушения. Число концевых мер в блоке не должно превышать пяти штук.

Средний срок сохраняемости концевых мер из стали – не менее одного года, а из твердого сплава – не менее двух лет.

Пример условных обозначений. Набор № 2 концевых мер из стали класса точности 1: Концевые меры 1–Н2 ГОСТ 9038-83.

Область применения концевых мер еще более расширяется при использовании их совместно с принадлежностями. В набор принадлежностей к концевым мерам длины входят следующие: державка (струбцина) основание; стяжки, предназначенные для скрепления блоков, размером более 100 мм; зажимной сухарь, служащий для крепления стяжками блоков концевых мер с боковиками.

Измерительные линейки относятся к штриховым мерам и предназначены для измерения размеров изделий прямым методом. Конструкции линеек однотипны. Они представляют собой металлическую полосу шириной 20... 40 мм и толщиной 0,5 ... 1,0 мм, на широкой поверхности которой нанесены деления. Линейки изготавливаются с одной или двумя шкалами с верхними пределами измерений 150, 300, 500 и 1000 мм и ценой деления 0,5 или 1 мм.

Допускаемые отклонения действительной общей длины шкалы линеек от номинального значения находятся в пределах $\pm(0,10... 0,20)$ мм в зависимости от общей длины шкалы.

Проверку линейек производят по образцовым измерительным линейкам, которые называют штриховыми мерами. Погрешность такого сравнения не превышает 0,01 мм.

3.3.1. Измерительные линейки, штангенинструмент и микрометрические инструменты

Штангенинструмент предназначен для абсолютных измерений линейных размеров наружных и внутренних поверхностей, а также для воспроизведения размеров при разметке деталей.

К нему относятся штангенциркули (рис. 3.7.), штангенглубиномеры и штангенрейсмасы. Основными частями штангенинструментов являются штанга-линейка с делениями шкалы 1 мм и перемещающаяся по линейке шкала-нониус. По шкале-линейке отсчитывают целое число миллиметров, а по нониусу – десятые и сотые доли миллиметра.

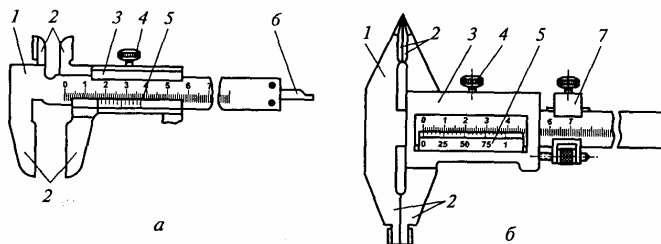
Для отсчета с помощью нониуса сначала определяют по основной шкале целое число миллиметров перед нулевым делением нониуса. Затем добавляют к нему число долей по нониусу в соответствии с тем, какой штрих шкалы нониуса ближе к штриху основной шкалы.

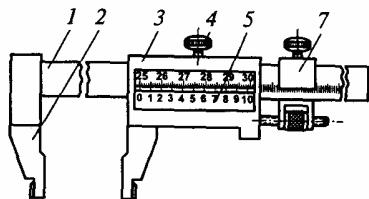
Основные типы нониусов (I–IV) представлены на рис. 3.8.

Основными характеристиками нониуса являются величина отсчета по нониусу (цена деления нониуса) a и модуль нониуса γ , которые определяются по следующим формулам:

$$a = i/n; \quad \gamma = (1+i)/ni \quad (3.1)$$

где i – цена деления основной шкалы, мм; n – число делений нониуса; l – длина шкалы нониуса, мм.





в

Рис. 3.7. Конструкция штангенциркулей:

а – типа Ш Ц–I; *б* – типа Ш Ц–II; *в* – типа Ш Ц–III; 1 – штанга-линейка; 2 – измерительные губки; 3 – рамка; 4 – винт зажима рамки; 5 – нониус; 6 – линейка глубиномера; 7 – рамка

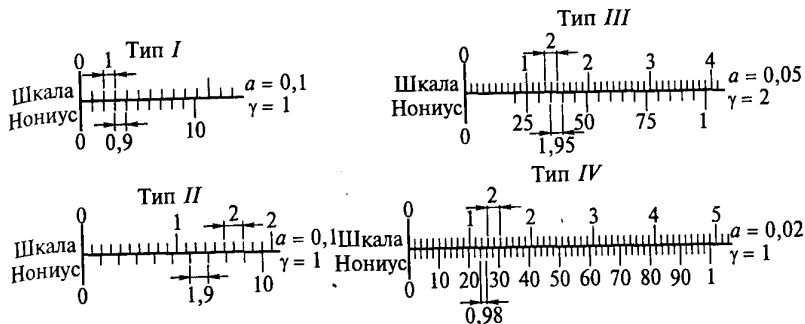


Рис. 3.8. Типы нониусов

Наибольшее распространение получили нониусы с точностью отсчета 0,1; 0,05; 0,02 мм. ГОСТ 166-80 предусматривает изготовление и использование трех типов штангенциркулей: Ш Ц–I с ценой деления 0,1 мм, Ш Ц–II с ценой деления 0,05 мм и Ш Ц–III с ценой деления 0,05 и 0,1 мм. По основной линейке с неподвижными губками перемещается рамка с подвижными измерительными губками. Для плавного перемещения рамки по штанге-линейке предусмотрено микрометрическое устройство, состоящее из хомутка, зажима и гайки микрометрической подачи. На подвижной рамке установлен стопорный винт.

В штангу индикаторного штангенциркуля (рис. 3.9) вмонтирована зубчатая рейка 2, по которой перемещается зубчатое колесо 3 индикатора, закрепленного на рамке 1. Перемещение зубчатого колеса передается на стрелку индикатора, показывающую единицы, десятые и сотые доли миллиметра.

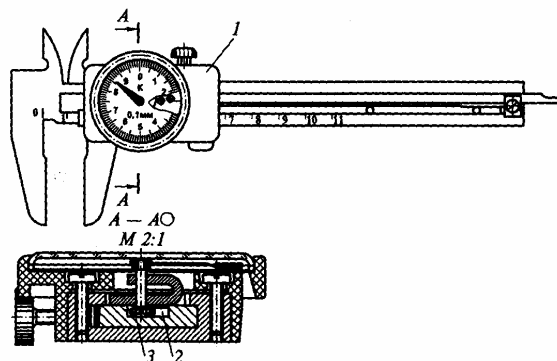


Рис. 3.9. Конструкция индикаторного штангенциркуля:
1 – рамка; 2 – зубчатая рейка; 3 – зубчатое колесо

Штангенглубиномер (рис. 3.9) принципиально не отличается от штангенциркулей и применяется для измерения глубины отверстий и пазов. Рабочими поверхностями штангенглубиномеров являются торцовая поверхность штанги-линейки и база для измерений – нижняя поверхность основания. Для удобства отсчета результатов измерений, повышения точности и производительности контрольных операций в некоторых типах штангенглубиномеров вместо нониусной шкалы предусматривается установка индикатора часового типа с ценой деления 0,05 и 0,01 мм.

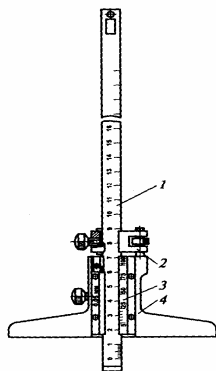


Рис. 3.10. Штангенглубиномер:
1 – штанга-линейка; 2 – рамка
микрометрической подачи;
3 – нониус; 4 – основание

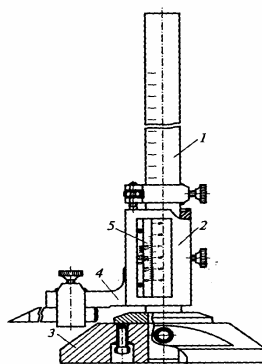


Рис. 3.11. Штангенрейсмас:
1 – штанга-линейка;
2 – рамка; 3 – основание;
4 – державка; 5 – нониус

Штангенрейсмасы (рис. 3.11) являются основными измерительными инструментами для разметки деталей и определения их высоты. Они могут иметь дополнительный присоединительный узел для установки измерительных головок параллельно или перпендикулярно плоскости основания. Конструкция и принцип действия штангенрейсмасы принципиально не отличаются от конструкции и принципа действия штангенциркуля. На заводах применяются штангенрейсмасы с индикаторным и цифровым отсчетом показаний.

Угломеры с нониусом предназначены для измерения угловых размеров и разметки деталей с точностью до $2'$. Для измерения углов от 0 до 90° (рис. 3.12, а) на подвижную линейку 5 устанавливается добавочный угольник 4. Измерение углов от 90 до 180° проводится без добавочного угольника 4 (рис. 3.12, б). Порядок отсчета на угловом нониусе угломера аналогичен отсчету на линейном нониусе штангенциркуля.

Микрометрические инструменты предназначены для абсолютных измерений наружных и внутренних размеров, высот уступов, глубин отверстий и пазов и т. д. К ним относятся гладкие микрометры (рис. 3.13); микрометры со вставками, микрометрические глубиномеры; микрометрические нутромеры.

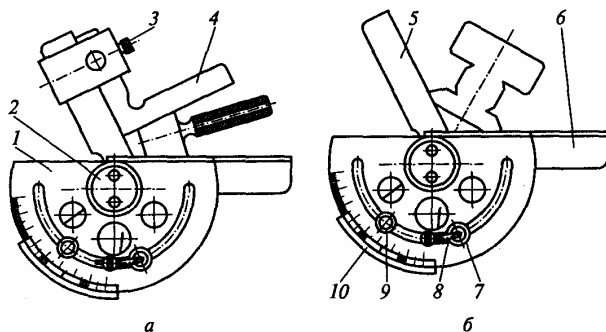


Рис. 3.12. Конструкция угломера с нониусом:

1 – полудиск; 2 – зажимной винт; 3 – винт зажима угольника; 4 – добавочный угольник; 5 – подвижная линейка; 6 – неподвижная линейка; 7 и 8 – устройство для микрометрической подачи; 9 – стопорный винт; 10 – нониус

Принцип действия этих инструментов основан на использовании винтовой пары (винт – гайка) для преобразования вращательного движения микрометрического винта в поступательное. Основными частями микрометрических инструментов являются: корпус, стебель, внутри которого с одной стороны имеется микрометрическая резьба с шагом 0,5 мм, а с другой – гладкое цилиндрическое отверстие, обеспечивающее точное направление перемещения винта. На винт установлен барабан, соединенный с трещоткой, обеспечивающий постоянное усилие измерения. Стопор служит для закрепления винта в нужном положении.

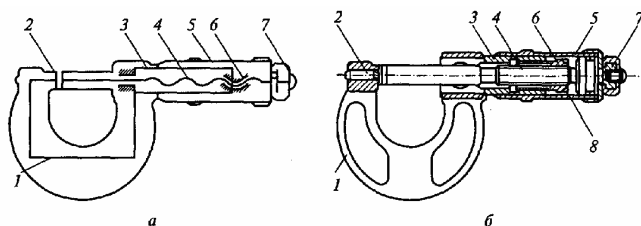


Рис. 3.13. Гладкий микрометр:

*а – кинематическая схема; б – принципиальная схема; 1 – корпус;
2 – неподвижная пятка; 3 – стебель; 4 – микрометрический винт;
5 – барабан; 6 – гайка микрометрической пары; 7 – устройство стабилизации
усилия измерений (трещотка); 8 – контргайка миллиметр и 0,5 мм*

Отсчетное устройство микрометрических инструментов состоит из двух шкал: продольной и круговой. По продольной шкале отсчитывают целые, по круговой шкале – десятые и сотые миллиметра.

Основные метрологические характеристики микрометрических инструментов приведены в табл. 3.2.

Гладкие микрометры типа МК (см. рис. 3.12) выпускаются с различными пределами измерения: от 0 до 300 мм с диапазоном показаний шкалы 25 мм, а также 300...400, 400... 500 и 500...600 мм. Предельная погрешность микрометров зависит от верхних пределов измерения и может составлять от ± 3 мкм. Для микрометров МК–25 до ± 50 мкм – для микрометров МК–500. Выпускаются микрометры с цифровым отсчетом всего результата измерения. Отсчетное устройство в таких микрометрах действует по механическому принципу.

Таблица 3.2
Основные метрологические характеристики
микрометрических инструментов

Измерительное средство	Цена деления шкалы, мм	Диапазон показаний шкалы, мм	Пределы измерения инструмента, мм	Предельная погрешность инструмента, мкм	Измерительное усилие, Н
Микрометры гладкие типа МК для измерения наружных размеров (ГОСТ 6507–78)	0,01	25	0...25 25 ...50 50...75 75... 100 и т. д.	+2 0 ±2,5 ±2,5 ±2,5	5 9
Нутромер микрометрический (тип НМ) (ГОСТ10–75)	0,01	25 100 525 1100	50...75 75... 175 75 ... 600 150...1250 и т. д.	±4,0 ±6,0 ±15,0 ±20'0	
Глубиномер микрометрический (ГОСТ 7470–78)	0,01	25	0...25 25 ...50 50 ...75 75... 100 100... 125 125... 150	±2,0 ±3, 0 ±3,0 ±3,0 ±4,0 ±4,0	3...7

Микрометрический глубиномер (ГОСТ 7470–78) (рис. 3.14) предназначен для абсолютных измерений глубин отверстий, высот выступов и т. д. Он имеет стебель 3, закрепленный на траверсе 4, с помощью гайки фиксации 6. Одной измерительной поверхностью является нижняя плоскость траверсы 4, другой –плоскость микрометрического винта, соединенного с подвижной пяткой 5. Микровинт вращается трещоткой 7, соединенной с барабаном 2. В комплект микрометрического глубиномера входят установочные меры с плоскими измерительными торцами.

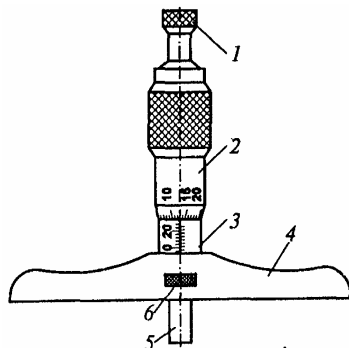


Рис. 3.14. Микрометрический глубиномер

Микрометрический нутромер (рис. 3.15) предназначен для абсолютных измерений внутренних размеров. При измерении измерительные наконечники приводят в соприкосновение со стенками проверяемого отверстия. Микрометрические нутромеры не имеют трещоток, поэтому плотность соприкосновения определяется на ощупь.

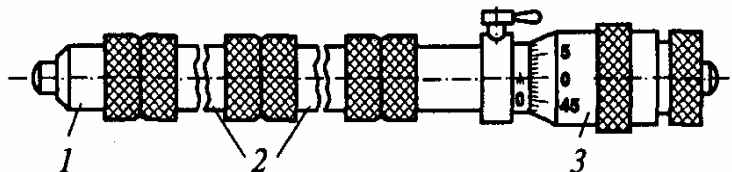


Рис. 3.15. Микрометрический нутромер:

1 – трещотка; 2 – барабан; 3 – стержень; 4 – траверса; 5 – подвижная пятка; 6 – гайка фиксации

Микрометрические нутромеры типа НМ выпускают с пределами измерений 50...75, 75... 175, 75...600, 150... 1250, 800... 2500, 1250... 4000, 2500... 6000 и 4000... 10000 мм. При необходимости увеличения пределов измерений используются удлинители.

3.3.2. Средства измерения и контроля с оптическим и оптико-механическим преобразованием

Оптико-механические измерительные приборы находят широкое применение для измерения калибров, плоскопараллельных концевых мер длины, точных изделий, а также для настройки и проверки

средств активного и пассивного контроля. Эти приборы основаны на сочетании оптических систем и механических передач.

К оптико-механическим измерительным приборам относятся пружинно-оптические измерительные головки (оптикаторы), оптиметры, длинномеры, измерительные машины и ряд других приборов.

Рассмотрим некоторые из этих средств измерений.

Оптический длиномер (рис. 3.16, а) состоит из измерительной головки и вертикальной или горизонтальной стойки. Схема работы длинномера показана на рис. 3.16, б. Конструкция длинномера соответствует принципу Аббе, т. е. основная шкала является продолжением измеряемой детали 3. В пиноли закреплен измерительный наконечник 4, входящий в соприкосновение с измеряемой деталью 3. Сила тяжести пиноли 5 уравновешена противовесом, который перемещается внутри масляного демпфера 2. Пиноль 5 соединена с противовесом стальной лентой, перекинутой через блоки, причем измерительная сила длинномера определяется разностью масс пиноли 5 и противовеса 1. Она регулируется с помощью грузовых шайб 8. Отсчеты по стеклянной шкале 6, освещаемой источником света S, производят с помощью отсчетного микроскопа 7 со спиральным нониусом.

В настоящее время все большее распространение получают длинномеры с цифровым отсчетом, на табло которых высвечивается непосредственно измеряемый размер.

Измерительные машины (одно-, двух- и трехкоординатные) предназначены для контроля сложных корпусных деталей, деталей значительных длин, измерения расстояний между осями отверстий, лежащих в одной или разных плоскостях, контроля параметров плоских профильных шаблонов в прямоугольных и полярных координатах. Двух- и трехкоординатные измерительные машины позволяют получать цифровой отсчет с автоматической выдачей результатов измерений на ЭВМ с последующим применением полученных программ в станках с ЧПУ для обработки аналогичных деталей (обработка по моделям).

Оптические линейки предназначены для определения отклонений от прямолинейности и плоскостности поверочных линеек, плит, а также направляющих поверхностей станков, образующих валов.

Существуют следующие типы оптических линеек: ОЛ – контактные с визуальной системой отсчета, ОЛА – контактные с автоматической регистрацией, ОЛБ – бесконтактные, ОЛУ – универсальные с контактным и бесконтактным методами измерений.

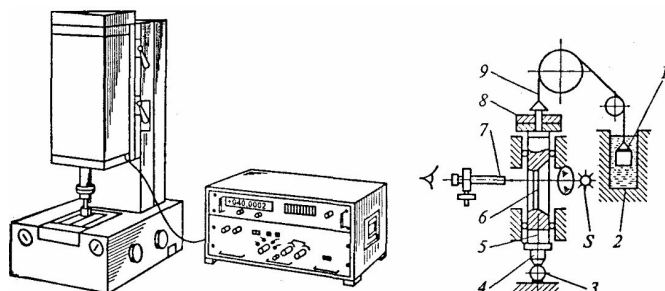


Рис. 3.16. Оптический длинномер (а) и схема его работы (б):

1 – противовес; 2 – масляный демпфер; 3 – измеряемая деталь; 4 – измерительный наконечник; 5 – пиноль; 6 – стеклянная шкала; 7 – отсчетный микроскоп; 8 – грузовые шайбы; 9 – стальная лента; S – источник света

Схема оптической линейки представлена на рис. 3.17. Прибор основан на измерении отклонений точек контролируемой поверхности от воображаемой прямой – оптической оси. Линейка 5 (тонкостенная труба с оптической системой) устанавливается на две опоры 4. Она имеет сквозной шлиц, вдоль которого перемещается измерительная каретка 3 с шупом 2, касающимся контролируемой поверхности. Для определения отклонений точек поверхности необходимо совмещать видимые на экране визирный штрих 7 и бифиляр 6 и снимать отсчеты по барабану микрометра 7.

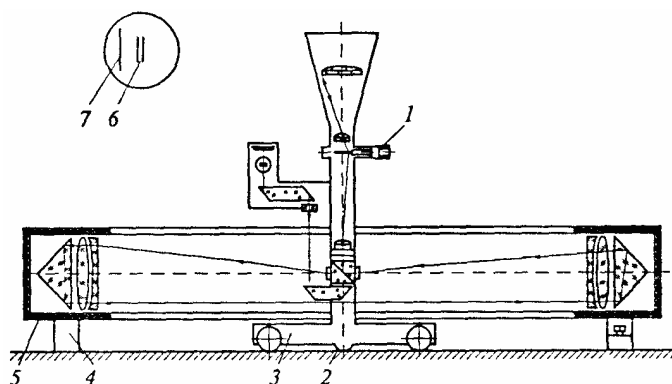


Рис. 3.17. Схема оптической линейки:

1 – микрометр; 2 – шуп; 3 – измерительная каретка; 4 – опоры; 5 – линейка; 6 – бифиляр; 7 – визирный штрих

Оптические линейки могут иметь регистрирующее устройство в виде профилографа, позволяющего графически воспроизводить на бумаге профиль контролируемой поверхности.

Основные параметры оптических линеек представлены в табл. 3.3. Условное обозначение оптической линейки, например автоматической, с наибольшей длиной контролируемой поверхности 1600 мм: ОЛА–1600.

Проекторы предназначены для контроля или измерения деталей сложного контура. Проектор состоит из объектива, дающего увеличенное изображение контролируемого изделия, и экрана, на котором оно рассматривается или сравнивается с сетками или предельными контурами. Проекторы бывают с экранами, работающими в проходящем и отраженном свете.

Таблица 3.3
Основные параметры оптических линеек

Типоразмер	Наибольшая длина контролируемого участка поверхности, мм	Диапазон измеряемых отклонений с отсчетного и регистрирующего устройства, мм	Пределы дополнительной погрешности прибора, мкм	Цена деления отсчетного устройства, мкм	Измерительное усилие наконечника, Н
ОЛ-800	До 800	$\pm(0,2 \dots 0,05)$	$\pm(0,5 + 3 h)$	0,5	7,0
ОЛ-1600	1600	$\pm(0,4 \dots 0,1)$	$\pm(1,0 + 10 h)$	1,0	7,0
ОЛА-800	800	$\pm(0,025 \dots 0,1)$	$\pm(1,2 + 10 h)$	-	18,0
ОЛБ-800	800	$\pm(0,2 \dots 0,5)$	$\pm(0,5 + 3 h)$	0,5	-
ОЛУ-800	800	$\pm(0,2 \dots 0,05)$	$\pm(0,5 + 3 h)$	0,5	7,0

3.3.3. Средства измерения и контроля с электрическим и электромеханическим преобразованием

Электрические и электромеханические измерительные приборы характеризуются наличием единого источника энергии – электрического тока. Широкое распространение в измерительной технике получили электрические преобразователи, индуктивные, емкостные, электрические и фотоэлектрические приборы. Они отличаются высокой точностью, позволяют вести дистанционные измерения, имеют сравнительно небольшие габаритные размеры, обладают незначительной инерционностью.

Электрические преобразователи являются одной из составляющих частей электромеханических измерительных приборов.

В индуктивных приборах (рис. 3.18) используется свойство катушки изменять свое реактивное сопротивление при изменении некоторых ее параметров, определяющих величину индуктивности L . Для получения возможно большей индуктивности катушку, как правило, выполняют с магни-

топроводом из ферромагнитного материала. Один из элементов магнитопровода 2 – якорь 3 выполняют подвижным, а его положение относительно неподвижной части магнитопровода 2 будет определять величину изменения магнитного сопротивления цепи, а, следовательно, и индуктивной катушки 1. Изменение индуктивного сопротивления катушки ведет к соответствующему изменению ее полного сопротивления R . Таким образом, если связать перемещение якоря с измеряемой величиной 5 при постоянной скорости перемещения, возникает функциональная зависимость между δ и электрическим параметром L . Устройство, которое преобразует линейные перемещения в электрический параметр с помощью описанной выше катушки, называется *индуктивным преобразователем*.

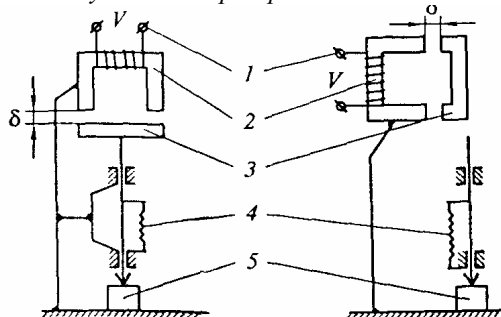


Рис. 3.18. Принципиальные схемы индуктивных преобразователей:
1 – индуктивная катушка; 2 – магнитопровод; 3 – якорь;
4 – пружина; 5 – объект измерения

Индуктивные измерительные приборы могут быть бесконтактными и контактными. В бесконтактном индуктивном приборе контролируемая деталь (только из ферромагнитных материалов) непосредственно включена в магнитную цепь, образуя участок магнитопровода. Схема контактного безрычажного дифференциального индуктивного прибора с малым ходом, например, модель БВ–3099, или 226, показана на рис. 3.19. Отклонение размеров контролируемой детали 9 вызывает перемещение измерительного стержня 8, на котором закреплен якорь 6, находящийся в воздушном зазоре между магнитопроводами индуктивных катушек 1 и 7. В зависимости от положения якоря меняется воздушный зазор у магнитопроводов, в результате чего индуктивное сопротивление одной катушки возрастает, а другой – уменьшается. При этом нарушается равновесие моста, образованного индуктивными катушками 1 и 7 и сопротивлениями 2 и 4, который питается от стабилизированного генератора звуковой частоты 3. В результате в диагонали моста возникает ток, направление которого определяется отклоне-

нием в ту или иную сторону измерительного стержня от среднего положения. Отсчетный прибор 5, включенный в диагональ моста через фазочувствительный выпрямитель, показывает величину этого отклонения.

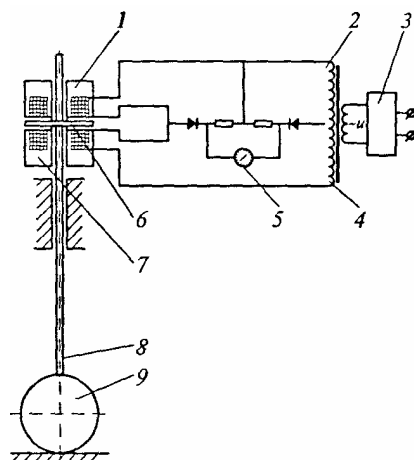


Рис. 3.19. Схема индуктивного прибора:

- 1 и 7 – индуктивная катушка; 2 и 4 – сопротивление; 3 – генератор;
5 – отсчетный прибор; 6 – якорь; 8 – измерительный стержень;
9 – контролируемая деталь

Индуктивные приборы выпускают как со стрелочными показывающими приборами, которые имеют пять регулируемых пределов измерения $\pm(1; 3; 10; 30; 100)$ мкм с разной ценой деления (0,02; 0,05; 0,2; 2 мкм, соответственно), так и с цифровыми устройствами, имеющими три регулируемых предела измерения $\pm(10; 100 \text{ и } 1000)$ мкм с разной ценой деления (0,005; 0,05 и 0,5 мкм, соответственно).

В емкостных измерительных системах используется принцип преобразования линейных перемещений в изменение электрической емкости конденсатора. По изменению емкости судят об изменении размера. Емкостные измерительные приборы могут быть бесконтактными и контактными. В бесконтактном приборе контролируемая деталь непосредственно включается в электрическую цепь в качестве одной из пластин конденсатора. Схема прибора, в котором применен дифференциальный емкостный преобразователь с двумя неподвижными пластинами, включенными в мостовую схему, показана на рис. 3.20. Изменение положения измерительного стержня 10, на конце ко-

того закреплена подвижная пластина 13, при измерении объекта измерения 8, установленного на измерительном столе 9, влечет за собой изменение емкости двух конденсаторов, образованных пластинами 7, 13 и 1, 13. Эти конденсаторы и регулировочный конденсатор 2 включены в мостовую схему, которая питается от высокочастотного генератора 3. Выходное напряжение преобразователя через усилитель 4 подается на показывающий прибор 5 и исполнительное реле 6.

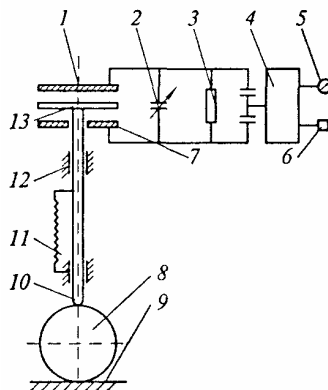


Рис. 3.20. Схема емкостного прибора:

- 1 и 7 – неподвижная пластина; 2 – конденсатор; 3 – генератор;
4 – усилитель; 5 – показывающий прибор; 6 – реле; 8 – объект измерения;
9 – измерительный стол; 10 – измерительный стержень; 11 – пружина;
12 – направляющие; 13 – подвижная пластина

В фотоэлектрических измерительных приборах с помощью оптической системы, построенной на диафрагмировании или отражении светового потока и фотоэлемента, энергия света преобразуется в электрический сигнал, который, усиливаясь, поступает либо на показывающий прибор, либо в устройство для подачи с команд.

Фотоэлектрические измерительные системы для непрерывного измерения размера контролируемых деталей по изменению величины светового потока, падающего на катод фотоэлемента, применяются редко. Причиной этому является нестабильность характеристик фотоэлементов во времени.

Фотоэлектрические преобразователи, которые являются базовым элементом рассматриваемых систем, широко применяются в дискретных измерительных системах с отражением светового потока, например, в автоматах ЛИЗ для контроля и сортировки деталей подшипников качения, в счетных схемах, оптических системах для измерения перемещений и др.

4. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

4.1. Методы и средства измерения и контроля кинематических величин

Параметрами механического движения, подлежащими измерению на практике, являются перемещение, скорость и ускорение. Это кинематические параметры и они взаимосвязаны: зная перемещение и время перемещения, можно определить скорость и ускорение:

скорость – перемещение/время, м/с;

ускорение – перемещение/квадрат времени, м/с².

В свою очередь, по известному ускорению можно получить скорость и перемещение.

Диапазоны измеряемых скоростей и ускорений чрезвычайно велики. Условно их разбивают на поддиапазоны.

Линейные скорости (до), м/с:

Околосветовые	$3 \cdot 10^6$
космические	$2 \cdot 10^4$
авиационных объектов	10^3
транспортные	50
промышленные	10
малые технические	10^{-1}
весьма малые	10^{-5}
Угловые скорости (до), рад/с:	
весьма большие	$3 \cdot 10^4$
средние	10^2
малые	10
малые технические	1
весьма малые	10^{-5}
Ускорения (до), м/с ² :	
весьма большие	$2 \cdot 10^5$
большие	10^3
средние	10^2
малые	1
весьма малые	10^{-5}

Параметры движения по характеру изменения во времени можно разбить на параметры поступательного, вращательного и колебательного движений.

Средства измерений и контроля, предназначенные для измерения линейных скоростей, называются *измерителями скорости*; средства для измерения и контроля угловых скоростей (частоты вращения) – *тахометрами*, а средства для измерения ускорений – *акселерометрами*. Большой класс средств измерений применяется для измерения параметров колебательного движения (вибраций). Если измеряются параметры вибраций машин, устройств, сооружений, то соответствующие средства называются *виброметрами*.

Методы и средства измерения и контроля линейных скоростей. Наиболее распространенные методы измерения линейных скоростей движущихся твердых тел: аэрометрический, компенсационный, термодинамический, корреляционный, доплеровский, электромагнитный, инерциальный и др.

Аэрометрический метод (рис. 4.1,а) основан на измерении скоростного (динамического) напора, функционально связанного со скоростью тела, движущегося в воздушной среде. Скоростной напор определяется манометрической коробкой 3 путем сравнения статического давления, образуемого при движении воздушной среды в приемнике статического давления 1 и приемнике полного давления 6. Результат сравнения показывается стрелкой 4 на отсчетном устройстве. Средства измерения, построенные на аэрометрическом методе, позволяют измерять скорость с погрешностью, не превышающей 2... 3 %.

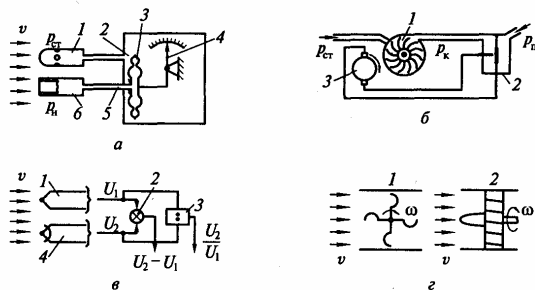


Рис. 4.1. Методы измерения и контроля линейных скоростей:

- а – аэрометрический (1 – приемник статического давления; 2 – корпус; 3 – манометрическая коробка; 4 – стрелка; 5 – трубопроводы;
- б – приемник полного давления); б – компенсационный (1 – воздушный компрессор; 2 – манометрическое реле; 3 – двигатель); в – термодинамический (1 – открытая термопара; 2 – сумматор; 3 – делитель; 4 – экранированная термопара);
- г – турбинный (1 – тангенциальная турбинка; 2 – аксиальная турбинка)

Компенсационный метод (рис. 6.1, б) основан на автоматическом уравнивании полного давления p_n и давления p_k , развиваемым воздушным компрессором 1. В манометрическом реле 2 с двумя полостями, в одну из которых поступает полное давление p_n , а во вторую – давление p_k , p_n и p_k уравниваются.

Замыкание цепи двигателя 3, приводящего во вращение компрессор, происходит тогда, когда давление p_n больше p_k . При этом мембрана манометрического реле 2 прогибается влево. При замыкании и размыкании контактов частота вращения электродвигателя поддерживается такой, при которой обеспечивается равенство p_n и p_k .

Термодинамический метод (рис. 4.1, в) основан на измерении температуры заторможенного потока воздушной среды с помощью открытой термопары 1 и экранированной термопары 4 (либо других преобразователей температуры). Разность сопротивлений этих терморезисторов улавливается сумматором 2 и делителем 3. Для реализации этого метода необходимы малоинерционные измерители температуры.

В *турбинном методе* (рис. 4.1, г) используется кинетическая энергия воздушного или водного потока для вращения тангенциальной 1 или аксиальной 2 турбинки. Частота вращения турбинки ω будет пропорциональна скорости движения.

Методы и средства измерения и контроля скоростей вращения, нашедшие наиболее широкое распространение в технике: центробежные, магнитоиндукционные, электрические (постоянного и переменного тока), индукционные и стробоскопические.

Центробежный метод характерен тем, что чувствительный элемент реагирует на центробежную силу, развиваемую неуравновешенными массами вращающегося вала. Этот метод реализуется в коническом и кольцевом тахометрах.

В коническом тахометре (рис. 4.2, а) на шарнирах, вращающихся вместе с осью, установлены грузики m , которые под действием центробежных сил расходятся, перемещая муфту 1 и сжимая пружину 2. Изменение положения муфты 1 регистрируется показывающим элементом тахометра – стрелкой. В кольцевом тахометре (рис. 6, б) при невращающейся оси 2 ($\omega = 0$) плоскость кольца наклонена по отношению к оси на определенный угол. При вращении кольцо стремится занять положение, перпендикулярное оси вращения, и вызывает перемещение муфты 1 и стрелки отсчетного устройства.

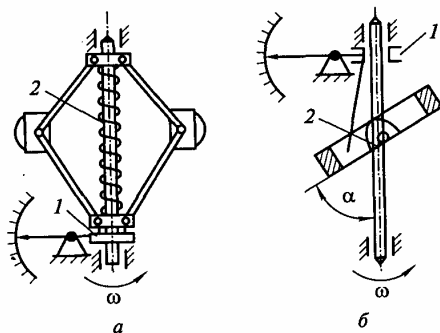


Рис. 4.2. Центробежные тахометры:
а – конический (1 – муфта; 2 – пружина); б – кольцевой (1 – муфта; 2 – ось)

Магнитоиндукционный метод основан на зависимости наводимых в металлическом теле вихревых токов от частоты вращения. Тахометры, построенные на этом методе, выполняются в двух вариантах: с цилиндрическим чувствительным элементом (рис. 4.3, а) и дисковым чувствительным элементом (рис. 4.3, б). Основной частью магнитоиндукционного тахометра является измерительный узел, который состоит из постоянного магнита 1 и чувствительного элемента 2, выполненного в виде полого цилиндра или диска. Обычно постоянный магнит имеет частоту вращения, которую необходимо измерить, а чувствительный элемент, выполненный из металла с большим удельным сопротивлением, удерживается от вращения спиральной пружиной. В целях уменьшения температурной погрешности от непостоянства магнитной индукции в зазоре применяют термомагнитный шпунт 3.

Магнитоиндукционные тахометры выполняются со шкалами, проградуированными в с^{-1} (типа ТЭ) и с процентными шкалами (типа ИТЭ).

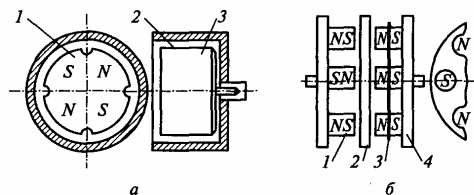


Рис. 4.3. Магнитоиндукционные тахометры:
а – с полым ротором; б – с диском; 1 – постоянный магнит;
2 – чувствительный элемент; 3 – термомагнитный шпунт; 4 – магнитопровод

Тахометр типа ИТЭ состоит из собственно тахометра (измерительного узла) и синхронной передачи переменного тока переменной частоты. Передача включает синхронный генератор трехфазного тока и синхронный двигатель с синхронным запуском.

Электрический метод измерения основан на независимости генерируемого напряжения от частоты вращения (для постоянного, переменного и импульсного тока), а для переменного и импульсного тока – на зависимости частоты тока от частоты вращения.

Электрические тахометры постоянного тока (рис. 4.4) включают в себя тахогенератор постоянного тока и гальванометр. Тахогенераторы бывают двух типов: с ограниченным и неограниченным углом поворота ротора.

Тахогенератор с ограниченным углом поворота ротора (рис. 4.4, а) выполняется с неподвижной статорной обмоткой, внутри которой помещается постоянный магнит, связанный с валом, скорость вращения которого измеряется. Такие тахогенераторы применяются в качестве преобразователей угловой скорости и скоростной обратной связи в системах управления.

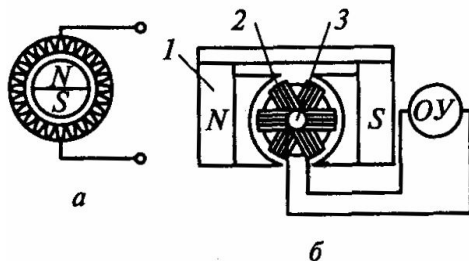


Рис. 4.4. Схемы электрических тахометров постоянного тока:

а – тахогенератора с $\varphi \leq \varphi_0$; б – тахогенератора постоянного тока;
 1 – постоянный магнит; 2 – обмотка якоря; 3 – коллектор со щетками;
 ОУ – отсчетное устройство

Основными элементами тахогенератора с неограниченным углом поворота (рис. 4.4, б) являются постоянный магнит 1 с соответствующими магнитопроводами, обмотка якоря 2 и коллектор со щетками 3. Снимаемое с коллектора напряжение постоянного тока измеряется гальванометром.

Методы и средства измерения ускорений. Ускорения измеряются в метрах на секунду в квадрате (м/с^2). В качестве единицы измерения ускорения часто применяют величину, связанную с ускорением земного притяжения $\dot{g}$. Например, ускорение, равное 0, $1\dot{g}$, $10\dot{g}$ и т. д. Ускорения могут быть линейными и угловыми. Средства измерения ускорений называются *акселерометрами*.

Для измерения линейных ускорений применяется инерциальный метод.

Инерциальный метод основан на измерении силы, развиваемой инерционной массой при ее движении с ускорением. Принцип действия средств измерений, реализующий инерциальный метод, состоит в следующем (рис. 4.5, а). Инерционная масса 1, связанная с корпусом прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 5, может перемещаться в направлении оси 7, называемой осью чувствительности. Перемещение инерционной массы, пропорциональное измеряемому ускорению, преобразуется посредством резистивных, индуктивных или емкостных преобразователей 6 в электрический сигнал, который после усиления в усилителе У поступает на электромагнит 3. Последний создает усилие F, уравнивающее инерционную силу ma_x , т. е.

$$F = ma_x,$$

где a_x – ускорение.

Методы одно- или двукратного дифференцирования сводятся соответственно к дифференцированию измеренных скорости или расстояния до неподвижной базы. Некоторые возможные схемы акселерометров представлены на (рис. 4.5, б, в, г). Основными элементами акселерометров являются подвесы инерционных масс, преобразователи сигналов, моментные (силовые) устройства, усилители сигналов и корректирующие устройства (демпферы). Для уменьшения потерь в осях подвеса, обеспечения линейной зависимости между отклонениями массы и измеряемым ускорением подвес помещают в жидкость с удельным весом, равным удельному весу чувствительного элемента, либо устанавливают его на воздушной подушке, на струнах. В качестве преобразователей сигналов применяются емкостные, индуктивные, фотоэлектрические, струнные и др.

Моментными (силовыми) устройствами для ввода сигналов обратной связи являются моментные двигатели (электродвигатели, работающие в заторможенном режиме) и электромагниты.

В маятниковых акселерометрах (рис. 4.5, б) чувствительный элемент 4 находится в жидкости 2, заключенной в корпусе 3. В акселерометрах со струнными преобразователями 1 и 5 (рис. 4.5, в) смещение массы m меняет упругие свойства струн 2 и 4, натянутых в направлении оси чувствительности.

Акселерометр с волоконно-оптическим измерительным преобразователем основан на эффекте фотоупругости. Некоторые материалы (эпоксидная смола, нитрат лития и др.) меняют свои оптические свойства при их деформировании. На этой основе создан целый ряд средств измерения, в которых сила преобразуется в деформацию. На

рис. 4.5, ε источник света 1, проходя через линзу 3 и поляризатор 4, поступает на стержень из фотоупругого материала 5, изменяющий свое напряженное состояние в зависимости от ускорения груза акселерометра 2.

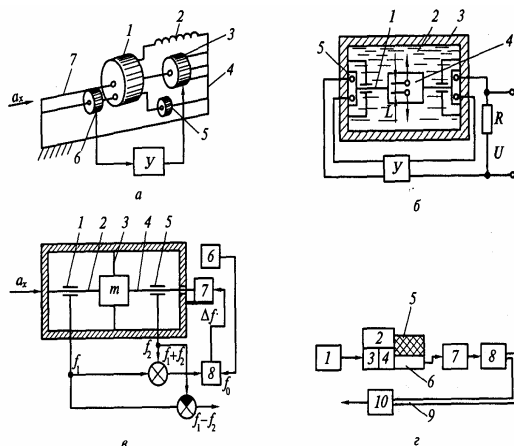


Рис. 4.5. Средства измерения ускорений:

а – схема акселерометра (1 – инерционная масса; 2 – пружина; 3 – электромагнит; 4 – корпус прибора; 5 – демпфер; 6 – преобразователь; 7 – ось; У – усилитель);
б – схема маятнкового акселерометра (1 – подвеска; 2 – жидкость; 3 – корпус; 4 – чувствительный элемент; 5 – преобразователь; У – усилитель); *в* – схема струнного акселерометра (1 и 5 – струнный преобразователь; 2 и 4 – струна; 3 – упругий подвес; 6 – генератор; 7 – механизм натяжения струн; 8 – регулирующее устройство); *з* – схема акселерометра с волоконно-оптическим преобразователем (1 – источник света; 2 – акселерометр; 3 и 8 – линза; 4 – поляризатор; 5 – фотоупругий материал; 6 – четвертьволновая пластина; 7 – анализатор; 9 – волоконный светопровод; 10 – приемник излучения – фотодиод)

Методы и средства измерения вибраций. При измерении вибраций всегда участвуют три элемента: вибрирующее звено, исходное (невибрирующее) звено и устройство для измерения движения вибрирующего звена относительно невибрирующего. Средство измерения вибраций носит название *виброметр* (рис. 4.6, *а*). Обычно исходное (невибрирующее) звено создается с помощью массы, которая может перемещаться вдоль (или вокруг) оси вибраций. Масса 1 связывается с основанием прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 3. Преобразователь 5 выдает сигнал смещения корпуса относительно массы 1 в зависимости от параметров массы 1, пружины 2 и демпфера 3.

Конструктивные схемы некоторых типов виброметров.

Применяемые в настоящее время виброметры имеют электрический выход. В качестве преобразователей перемещения в электрический сигнал используют резисторные, индуктивные, емкостные, электромагнитные и др.

На рис. 4.6, б представлена конструкция электромагнитного линейного виброметра с направляющей опорой для сейсмического элемента. Сейсмический элемент 8 установлен на опорном стержне 4 в вязкой жидкости 3. Направляющий диск 1 втулки 5 с малым трением позволяет перемещаться сейсмическому элементу вдоль оси чувствительности 2. Величина перемещения (вибрации) определяется наведением токов в обмотке 7, магнитом 6, закрепленным в сейсмическом элементе 8.

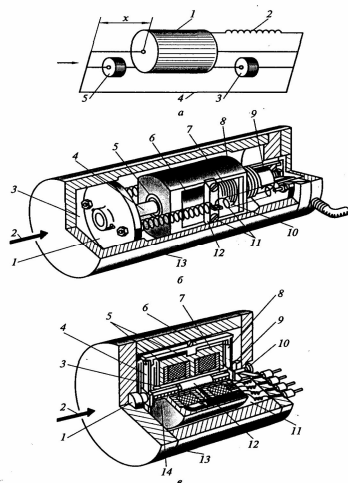


Рис. 4.6. Средства измерения вибраций:

- а – конструкция виброметра (1 – масса; 2 – пружина; 3 – демпфер; 4 – основа прибора; 5 – преобразователь); б – конструкция электромагнитного линейного виброметра (1 – направляющий диск; 2 – ось чувствительности; 3 – жидкость; 4 – опорный стержень; 5 – втулка; 6 – постоянный магнит; 7 – обмотка; 8 – сейсмический элемент; 9 – каркас катушки; 10 – паз; 11 – воздушный зазор; 12 – пружинный мост; 13 – корпус прибора); в – конструкция виброметра с индуктивным мостом (1 – опорный стержень; 2 – входная ось; 3 и 9 – немагнитная втулка; 4 – пружина; 5 – катушка; 6 – лента; 7 – сейсмический элемент; 8 – пластинчатая пружина; 10 – паз; 11 – жидкость; 12 – яркорь; 13 – корпус; 14 – шток)

Виброметр с индуктивным мостом (рис. 4.6, в). Сейсмический элемент 7, представляющий собой цилиндр из магнитного материала с малым гистерезисом, выполняет функции якоря 12 и перемещается между двумя катушками 5 в свободном пространстве, заполненном вязкой жидкостью 11. Сейсмический элемент 7 установлен на опорном стержне 1 с немагнитными втулками 3 и 9 и связан с корпусом прибора 13 пружинами 4 и 8. Регистрация сигнала виброметра проводится на осциллографе. Виброметр при объеме 45 см³ весит 200 г.

Прибор работает в диапазоне измерения ускорений до 10g.

4.2. Методы и средства измерения и контроля динамических величин

К динамическим величинам можно отнести следующие: массу, силу, давление, механическое напряжение, момент силы (крутящий момент), массовый расход вещества, работу, энергию, мощность.

Масса в международной системе единиц СИ является основной величиной, а остальные – производными.

Единицей массы является килограмм (кг). Для передачи единицы массы используются методы взвешивания и соответствующие средства измерений.

Единицей силы является ньютон (Н). Ньютон – это сила, которая придает массе 1 кг в направлении действия этой силы ускорение 1 м/с²:

$$F=ma. \quad (4.1)$$

Шкала сил воспроизводится с помощью силоизмерительных машин, механических и гидравлических преобразователей.

Давление P определяется как отношение силы F , которая действует на площадь S , Н/м²:

$$P=F/S. \quad (4.2)$$

Различают абсолютное давление p_a , избыточное давление, разрежение и атмосферное давление p_v . Избыточным давлением называют разность абсолютного и атмосферного давлений:

$$p_a - p_v \text{ при } p_a > p_v, \quad (4.3)$$

а разрежением – разность атмосферного и абсолютного давлений:

$$p_v - p_a \text{ при } p_a < p_v. \quad (4.4)$$

Единицей давления является паскаль (Па), равный ньютону на квадратный метр. Это давление, которое создается равномерно рас-

пределенной силой 1 Н, действующей перпендикулярно на площадь 1 м². Шкала давлений воспроизводится при помощи манометров (грузопоршневых, компрессионных, ртутных). Воспроизведение и передача единиц давления в промышленности осуществляются путем метрологического контроля и надзора поршневых манометров, контрольных преобразователей давления, пружинных манометров, ртутных барометров, компрессионных манометров, тонометров и т. д.

Единицей механического напряжения является паскаль (Па = Н/м²), определяющий напряжение, которое создается равномерно распределенной силой 1 Н, действующей на площадь 1 м²:

$$\sigma = F/S. \quad (4.5)$$

Единицей момента силы, крутящего момента является ньютон, умноженный на метр и деленный на радиан. Ньютон-метр на радиан – это крутящий момент, который создает сила 1 Н в точке: вращения, если сила приложена перпендикулярно радиусу-вектору, являющемуся плечом рычага, на расстоянии 1 м:

$$M_a = F_r / \alpha. \quad (4.6)$$

Единицей массового расхода вещества является килограмм в секунду (кг·с⁻¹). Это расход вещества (твердое тело, жидкость, газ) массой 1 кг за 1 с (кг·с⁻¹):

$$M = m/t. \quad (4.7)$$

Единицей работы, энергии является джоуль (Дж). Это работа, которая совершается при перемещении на 1 м точки приложения силы 1 Н в направлении действия силы:

$$W = Fl. \quad (4.8)$$

Единицей мощности является ватт (Вт). Это сила равномерно протекавшего процесса, при котором за время 1 с совершается работа 1 Дж:

$$P = W/t. \quad (4.9)$$

Из представленных выше определений и пояснений видно, что между массой, силой, моментом, напряжением, давлением существует взаимосвязь. Это позволяет применять для их измерения одни и те же или близкие методы и средства измерения.

Для измерения массы тела (вещества) применяются весоизмерительные средства, которые кратко называются *весами*.

Средства измерения, предназначенные для измерения сил, называются *динамометрами (силомерами)*. Близкими по назначению являются средства измерения крутящих моментов, называемые *моментамерами (торсиометрами)*.

Для измерения и контроля давления используют различного типа манометры, вакуумметры и барометры.

Рассмотрим основные методы и средства измерения сил и крутящих моментов.

Динамометры. Принцип действия динамометров основан на использовании деформации упругих тел под действием силы, пьезоэффекта, тензоэффекта, магнитоупругости материалов и др.

Динамометры можно классифицировать по принципу действия на механические, гидравлические и электрические. В табл. 4.1 приведены основные метрологические характеристики, принципиальные схемы, преимущества, недостатки и область применения механических динамометров, работающих на упругих элементах.

В качестве материалов для изготовления упругих элементов используют безгистерезисные металлы и неметаллы (например, кварцевое стекло, синтетические материалы).

В качестве примера механических динамометров с упругим элементом (рис. 4.7) рассмотрим конструкцию средства измерения силы тяги транспортных средств, усилий свинчивания резьбовых деталей и т. п. Здесь деформация упругого элемента воспринимается стрелочным указателем 2. Малые значения деформаций упругого элемента под действием сил F преобразуются в значительные перемещения стрелки или пера самопишущего устройства.

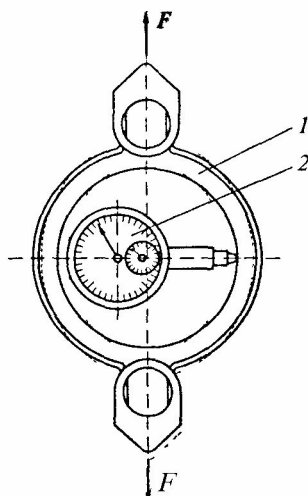
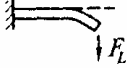
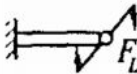
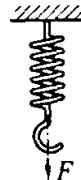
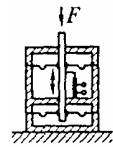
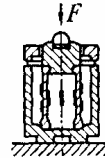
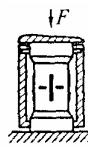


Рис. 4.7. Конструкция динамометра с упругим элементом:
1 — упругий элемент; 2 — стрелочный указатель

Таблица 4.1

Основные метрологические характеристики механических динамометров

Характеристики	Типы элемента							
	Работающие на изгиб		Торсионные упругие		Кольцевые упругие	Тарельчатые упругие	Цилиндрические упругие	
	прямые	витые	прямые	витые	цельные	за вальцованные	полые	цельные
								
Пределы измерения	0,01 Н...1 кН	0,01 Н...1 кН	0,1 Н...1 МН	0,1 Н... 10 МН	10... 100 Н	0,1...100 Н	10 Н...10 кН	ЮкН...0 МН
Погрешность измерения, %	$\pm (0,05... 1)$	$\pm (0,5... 1)$	$\pm (0,05... 0,5)$	$\pm (0,1... 1)$	$\pm (0,1... 0,5)$	$\pm (0,25... 1)$	$\pm (0,05... 0,5)$	$\pm (0,025... 0,5)$
Время успокоения, с	0,2...0,001				0,2...0,001			

Продолжение табл. 4.1

Преимущества	Линейная характеристика в диапазоне упругой деформации; не чувствительны к переменной нагрузке, дешевы	Универсальные преобразователи, просты, надежны	Универсальные преобразователи высокой точности
Недостатки	Чувствительны к перегрузкам, возникает остаточная деформация, требуются контроль нуля и последующая градуировка	Не используются для малых сил	Требуются большие затраты на вторичную электронную аппаратуру, не пригодны для малых сил
Область применения	Крановые, автомобильные, конвейерные весы; весы для упаковки, домашнего хозяйства, силоизмерители	Крановые, конвейерные, бункерные, автомобильные весы; весовые дозаторы; дозаторы для шихты; автоматические весы; электрические силоизмерительные системы	

Гидравлические динамометры представляют собой устройства, трансформирующие приложенное усилие в гидравлическое давление, измеряемое тем или иным способом.

На рис. 4.8 представлена конструкция гидравлического силоизмерителя (месдозы). Сила, воспринимаемая поршнем 2, через мембраны 1 и 3 трансформируется в давление, измеряемое манометром 6.

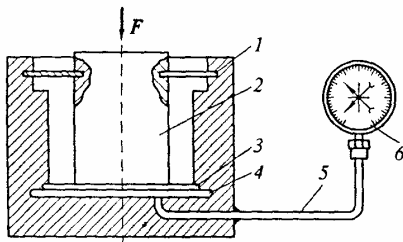


Рис. 4.8. Конструкция гидравлического силоизмерителя (месдозы):
1 и 3 – мембрана; 2 – поршень; 4 – полость; 5 – трубопровод; 6 – манометр

Механические и гидравлические динамометры отличаются высокой надежностью и простотой конструкции. Они могут работать при отсутствии источников энергии, что делает их удобными для эксплуатации в полевых условиях.

К недостаткам относятся: отсутствие возможности использования дистанционной индикации и регистрации показаний, относительно невысокая точность измерения 0,5...2 %, трудности измерения малых сил.

Наибольшее распространение получили электрические динамометры. В них используют измерительные преобразователи различных типов.

На рис. 4.9 представлены схемы различных типов динамометров, в которых в качестве преобразователя в электрический сигнал применяются устройства с электрически неактивными упругими элементами (см. рис. 4.9, а–з), электрически активными упругими элементами (см. рис. 2.59, и–л), силовым уравниванием (см. рис. 4.9, м).

В первой группе схем измеряемая сила сравнивается с силой упругости элемента, а его деформация преобразуется в электрический сигнал. К преобразователям той группы относят контактный, угольный, резонансный, индуктивный, емкостный, полупроводниковый и металлический.

Контактный и угольный, преобразователи (см. рис. 4.9, а, б) применяют для измерения сил в пределах 1... 10⁷ Н с погрешностью измерения 0,5... 1 % (для контактных) и больше 10 % – для угольных

преобразователей. Полупроводниковые преобразователи (см. рис. 4.9, в, з) используют для измерения сил в пределах $10^{-2} \dots 10^7$ Н с погрешностью 0,5...1 %.

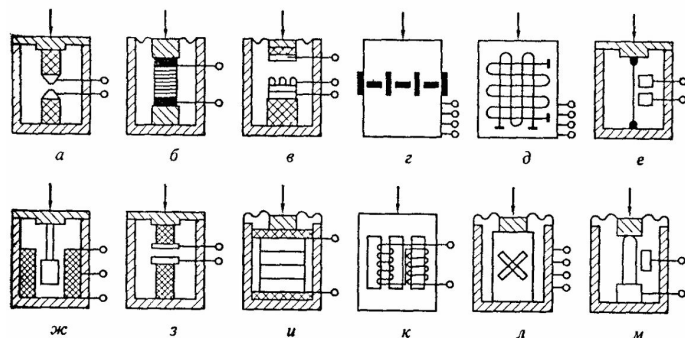


Рис. 4.9. Схемы электрических динамометров:

а – контактным; *б* – угольный; *в*, *г* – полупроводниковые; *д* – металлический;
е – резонансный; *ж* – индуктивный; *з* – емкостный; *и* – пьезоэлектрический;
к, *л* – магнитоупругие; *м* – с силовым уравновешиванием

Моментомеры. Принцип действия моментомеров основан на измерении деформации кручения вала, передающего крутящий момент. Моментомеры можно классифицировать на группы: с предварительным преобразованием в угловое перемещение, с непосредственным преобразованием. Деформацию можно измерять посредством тензорезисторного, индуктивного, магнитоупругого, струнного и других преобразователей. Диапазон измерения моментов для тензорезисторного и магнитоупругих моментомеров находится в пределах $10 \dots 10^3$ Нм, для струнных – $0 \dots 5 \cdot 10^6$ Нм, для индуктивных – $10^{-1} \dots 10^5$ Нм с погрешностью измерений 0,2... 1 %.

В качестве преобразователей, измеряющих угловые перемещения в моментомерах, чаще всего применяют индуктивные трансформаторные преобразователи. Эти устройства не требуют передачи электрических сигналов на вращающийся вал. Пример конструкции такого моментомера с индуктивным дифференциальным преобразователем представлен на рис. 4.10, а.

Он содержит торсионный упругий элемент в виде вала, соединяющего входной 9 и выходной 5 валы моментомера. На входном и выходном валах, установленных на подшипниках 4 и 10, закреплены полюсные наконечники 3 и 7 магнитопровода, вращающегося вместе с валом. Наконечники снабжены треугольными вырезами, входящими в соответствующую

щие вырезы центральной части 2, закрепленной на диафрагме 6, установленной в середине торсионного упругого элемента 8. При скручивании упругого элемента (рис. 4.10, б) за счет смещения полюсных наконечников относительно вырезов центральной части у одного из них результирующий зазор уменьшается, а у другого – увеличивается. В результате индуктивность одной катушки 1, неподвижно расположенной и магнитопроводе 11, увеличивается, а другой – уменьшается. Катушки включают в мостовую схему, питаемую переменным током.

Сигнал с мостовой схемы через усилитель и детектор (например, фазочувствительный) поступает на индицирующее или регистрирующее устройство.

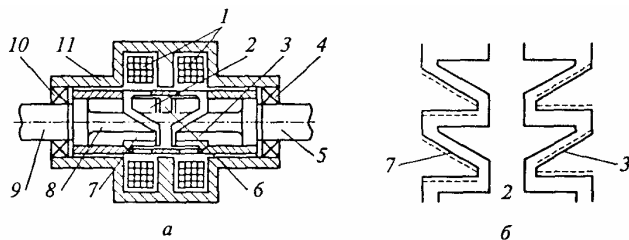


Рис. 4.10. Конструкция индуктивного моментомера (а) и упругого элемента (б):

- 1 – катушки; 2 – центральная часть; 3 и 7 – полюсный наконечник;
4 и 10 – подшипник; 5 – выходной вал; 6 – диафрагма;
8 – торсионный упругий элемент; 9 – входной вал; 11 – магнитопровод

В качестве измерителя угла скручивания при измерении момента при относительно постоянных частотах вращения валов может быть применен оптико-электронный преобразователь (моментомер) (рис. 4.11).

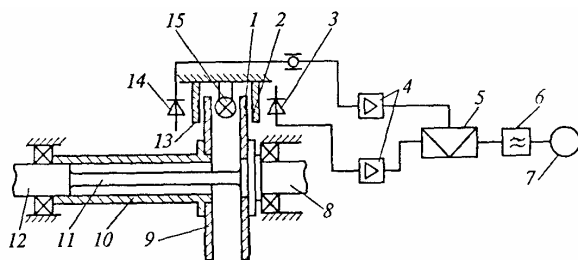


Рис. 4.11. Схема оптико-электронного моментомера:

- 1 и 9 – диск; 2 – растровые решетки; 3 и 14 – фоторезистор; 4 – усилители;
5 – фазовый детектор; 6 – фильтр; 7 – показывающее устройство; 8 – выходной вал;
10 – трубка; 11 – упругий торсион; 12 – входной вал; 13 – растр; 15 – осветитель

Он содержит упругий торсион 11, соединяющий входной 12 и выходной 8 валы. На входной вал 12 установлена жесткая трубка 10, несущая на себе прозрачный диск 9 с растром 13. На выходном валу 8 закреплен диск 1 с аналогичным растром. Между дисками расположен осветитель 15. Оптические растры дисков 1 и 9 взаимодействуют с неподвижными прозрачными растровыми решетками 2 и растром 13. На выходе световых пучков установлены фотоэлементы, фотодиоды или фоторезисторы 3 и 14.

При отсутствии крутящего момента с фоторезисторов 3 и 14 на ходы усилителей 4 поступают сигналы, частота которых одинакова. При передаче момента торсион деформируется, поворачиваясь на определенный угол, что вызывает отставание фазы напряжения с диска 1 от фазы напряжения с диска 9. Сигналы этих частот после усиления поступают на фазовый детектор 5, к которому через фильтр 6 верхних частот подключено показывающее устройство 7.

5. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

5.1. Измерение температур

Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Практически все технологические процессы и различные свойства вещества зависят от температуры.

В отличие от таких физических величин, как длина, масса и других, температура является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Так, если разделить на две равные части однородное тело, то его масса делится пополам. Температура, являющаяся интенсивной величиной, таким свойством аддитивности не обладает, т. е. для системы, находящейся в термическом равновесии, любая микроскопическая часть системы имеет одинаковую температуру. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, подобно тому, как создаются эталоны экстенсивных величин.

Измерять температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Эти свойства тел называют термометрическими. К ним относят длину, объем, плотность, термоЭДС, электрическое сопротивление и т. д. Вещества, характеризующиеся термометрическими свойствами, называют *термометрическими*. Средство измерений температуры называют *термометром*. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу.

Многие технологические и механические процессы связаны с выделением теплоты, которая существенным образом влияет на показатели процессов, состояние оборудования и т. д. Из физики известно, что наряду с работой, количество теплоты является мерой изменения внутренней энергии системы. Мерой, характеризующей состояние термодинамического равновесия макроскопической системы является физическая величина – температура.

В общем случае температура определяется как производная от энергии тела в целом по его энтропии. Такая температура всегда положительная, поскольку кинетическая энергия положительна. Ее называют абсолютной температурой или температурой по термодинамической температурной шкале.

За единицу абсолютной температуры в Международной системе единиц СИ принят Кельвин (К). Однако на практике существуют и

другие температурные шкалы – системы сопоставленных числовых значений температуры.

5.1.1. Температурные шкалы

Температура сама по себе не является непосредственно измеряемой величиной. Ее значение определяют по температурному изменению какого-либо удобного для измерения физического свойства термометрического вещества. Выбрав термометрическое вещество (воду, спирт, ртуть др.) и свойство необходимо задать начальную точку отсчета и размер единицы температуры – градуса. Таким образом определяют эмпирическую температурную шкалу. В ней обычно фиксируют две основные температуры, соответствующие точкам фазовых равновесий однокомпонентных систем, так называемые реперные или постоянные точки. Расстояние между этими точками называется основным температурным интервалом шкалы. Размер единичного интервала (единицы температуры) устанавливают как определенную долю основного интервала. За начало отсчета принимают одну из реперных точек.

Первой температурной шкалой была шкала, изобретенная Габриэлем Фаренгейтом в 1724 г. На ней были указаны три опорные (реперные) точки: температура смеси воды, льда и поваренной соли (0°F), температура тающего льда (32°F) и температура тела человека (96°F). Температура кипения воды при этом составила 212°F . Шкала Фаренгейта существует и поныне. Например, в США пользуются только этой шкалой при измерениях в технике, а градусы Цельсия ассоциируют с крепостью джина виски, водки и вина.

Есть еще одна шкала – это термодинамическая шкала английского физика Уильяма Томсона (Кельвина). В ней опорной точкой является абсолютный нуль (ОК). Это температура полного прекращения теплового движения молекул.

И, наконец, есть шкала шведского профессора астрологии Андреа Цельсия, предложенная им в 1742 году. Он остановился на двух опорных точках: температуре таяния льда (100) и температуре кипения воды (0). Интервал между ними был разделен на 100 равных частей. Вскоре известный ботаник Карл Линней поменял местами опорные точки, и термометр Цельсия приобрел привычный для нас вид. Поэтому данную шкалу правильно было бы называть *шкала Цельсия-Линнея*.

Соотношение для пересчета температуры из одной шкалы в другую выглядит следующим образом:

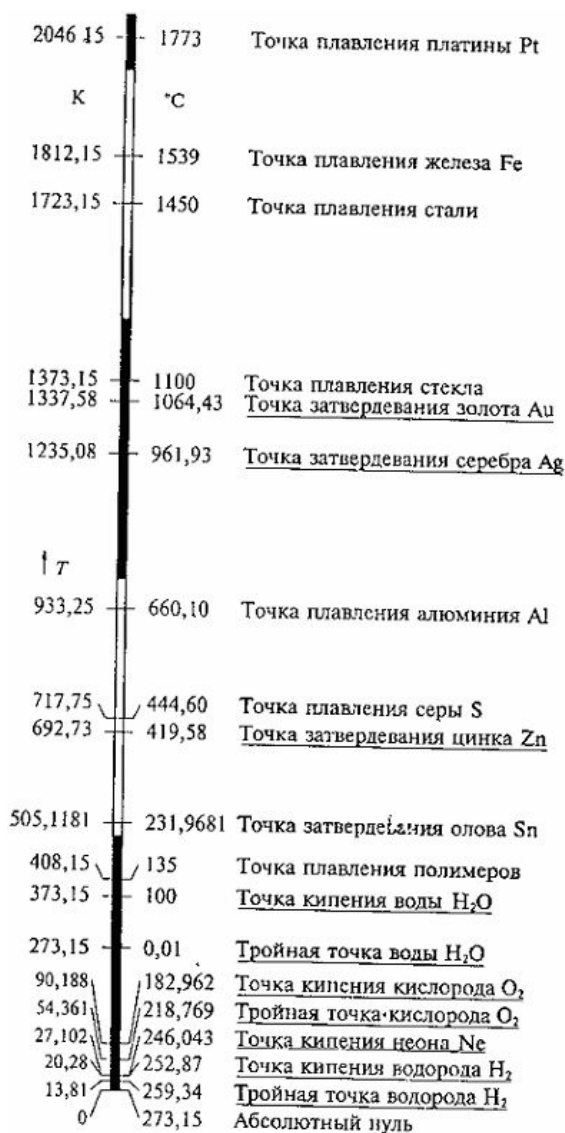


Рис. 5.1. Международная практическая температурная шкала (МПТШ-68)

$$nC = 0,8nR = (1,8n + 32)F,$$

и

$$TK = tC + 273,15K.$$

Измерить температуру непосредственно, как, например, линейные размеры, невозможно. Поэтому температуру определяют косвенно – по изменению физических свойств различных тел, получивших название термометрических.

Для практических целей, связанных с измерением температуры, принята Международная практическая температурная шкала МПТШ–68 (рис. 5.1), которая является обязательной для всех метрологических органов. Она основывается на ряде воспроизводимых состояний равновесия (реперных точек) некоторых веществ, которым присвоены определенные значения температуры.

5.1.2. Классификация средств измерения температуры

Все приборы для измерения температуры основаны на изменении свойств различных веществ в зависимости от температуры. Многообразное влияние температуры на изменение физических свойств веществ вызвало применение различных методов и средств измерения температуры.

В настоящее время существуют приборы для измерения температур, основанные на изменении:

- 1) объема тела (термометры расширения);
- 2) давления рабочего вещества в замкнутой камере (манометрические термометры);
- 3) электрического сопротивления проводников (термометры сопротивления);
- 4) термоэлектродвижущей силы (термоэлектрические пирометры);
- 5) лучеиспускательной способности нагретых тел (пирометры излучения).

По конструкции приборы можно разделить на следующие группы.

1. Термометры расширения:

а) жидкостные термометры, палочные и с вложенной шкалой, прямые и угловые, контактные, специальные (максимальные и минимальные);

б) дилатометрические (стержневые);

в) биметаллические.

2. *Манометрические термометры* различаются: а) по роду рабочего вещества – жидкостные, паровые, газовые;

б) по способу отсчета – показывающие, самопишущие и бесшкальные;

в) по способу установки – местные и дистанционные.

3. *Термометры сопротивления различаются:*

а) по роду применяемого материала – металлические (платиновые, никелевые, медные, железные) и полупроводниковые;

б) по способу отсчета – показывающие и самопишущие.

4. *Термоэлектрические пирометры различаются:*

а) по роду применяемого материала;

б) по методу компенсации – с автоматической компенсации, с коррекцией нуля, с введением в отсчет поправки;

в) по методу отсчета – показывающие и самопишущие.

5. *Пирометры излучения различаются как:*

а) пирометры частичного излучения (оптические), измеряющие температуру по яркости накаливаемого тела;

б) пирометры полного излучения (радиационные, измеряющие температуру по тепловому эффекту от излучения нагретого тела);

в) цветовые пирометры, определяющие температуру по цвету нагретого тела.

По назначению приборы делятся на рабочие и образцовые.

5.1.3. Термометры расширения, манометрические и сопротивления

Термометры стеклянные жидкостные. Термометры стеклянные жидкостные применяют для измерения температуры в пределах от - 200 до + 750 °С. Термометры используют исключительно при контактных измерениях.

Благодаря простоте в обращении и высокой точности измерения, жидкостные термометры находят широкое применение во всех областях народного хозяйства.

Термометры состоят из резервуара с припаянной к нему капиллярной трубкой. Капилляр снабжен шкалой с делениями в градусах Цельсия. Термометрическая жидкость заполняет резервуар и часть капиллярной трубки.

Действие жидкостных термометров основано на тепловом расширении термометрической жидкости, заключенной в резервуаре. При изменении температуры объем жидкости изменяется, вследствие чего она поднимается или опускается на величину, пропорциональную изменению температуры.

В зависимости от предела измерения температур применяют различные жидкости для заполнения термометров.

Жидкость	Предел температуры	
	от	до
Ртуть	-35	750
Толуол	-90	200
Этиловый спирт	-80	70
Керосин	-20	300
Петролейный эфир	-120	25
Пентол	-200	20

Наибольшее распространение получили ртутные термометры, благодаря своим свойствам.

Достоинства:

- ртуть не смачивает стекло;
- легко получить в химически чистом виде;
- остается жидкой в широком интервале температур.

Недостатки:

- малый коэффициент объемного расширения;
- нижний предел ограничивается температурой затвердевания (-38°)
- верхний предел определяется допустимыми температурами для стекла (600°). При замене стекла кварцем верхний предел можно повысить.

Термометры с органическими жидкостями предназначены для измерения низких температур от -200° до 200°C .

Основным их достоинством является высокий коэффициент объемного расширения жидкости в среднем почти в 6 раз больше, чем у ртути.

Недостаток – смачивание органическими жидкостями стекла, в результате чего точность измерения понижается (поэтому необходимо применение капилляров с относительно большим диаметром).

Технические термометры. Технические термометры предназначены для измерения температуры в промышленных установках и могут быть заполнены ртутью или органическими жидкостями.

В зависимости от формы нижней части технические термометры могут быть прямые и угловые.

С учетом условий эксплуатации ртутные технические термометры изготавливают для полного погружения, а термометры с органическими жидкостями – для полного и частичного погружения.

Технические электроконтактные термометры. Технические электроконтактные термометры применяют для сигнализации с регулированием t в интервале от -30 до $+300$ °С.

Эти термометры изготавливают с заданной температурой контактирования (ТЗК) и с неподвижным контактом (ТПК).

Технические электромагнитные термометры могут работать в цепях переменного и постоянного тока. Замыкание (размыкание) электрической цепи между контактами происходит вследствие расширения (сжатия) ртути при нагревании (охлаждении) нижней части термометра.

При применении электроконтактного термометра нижняя часть его должна полностью погружаться в измеряемую среду. Допускаемая погрешность показаний термометра не должна превышать цены наименьшего деления.

Поправки к показаниям и особенности применения стеклянных жидкостных термометров. При точных измерениях температуры с помощью жидкостных стеклянных термометров к их показаниям вводят следующие поправки:

- 1) основная (инструментальная);
- 2) на температуру выступающего столбика ртути;
- 3) на смещение нулевой точки.

Манометрические термометры. Манометрические термометры предназначены для измерения температуры жидких и газообразных сред в стационарных условиях в интервале от 150 ° до 600 °С.

Принцип действия манометрических термометров основан на изменении давлений заполнителя термосистемы от температуры измеряемой среды.

В зависимости от применяемого заполнителя термометры манометрические делятся на:

1. Газовые (-200 ° + 600 °С);
2. Жидкостные (-150 ° + 300 °С);
3. Конденсационные (-50 ° + 300 °С).

Термоэлектрические преобразователи (термометры). Термоэлектрические преобразователи применяют для измерения температуры от -200 ° до $+250$ °С. Принцип действия термопреобразователя основан на преобразовании тепловой энергии в термоЭДС элемента при наличии разности температур между его свободными концами и горячим спаем.

Возникновение ЭДС в термопреобразователе объясняется тем, что при его нагревании возникает поток электронов от горячего спая к холодному. На холодном спае создается отрицательный потенциал, а

на горячем положительный. Разность этих потенциалов будет определять величину термоЭДС термопреобразователя.

5.1.4. Пирометры

Бесконтактное измерение температуры. О температуре нагретого тела можно судить на основании измерения параметров его теплового излучения, представляющего собой электромагнитные волны различной длины. Термометры, действие которых основано на измерении теплового излучения, называются *пирометрами*. Они позволяют измерять температуру в диапазоне от 100 до 6000 °С и выше.

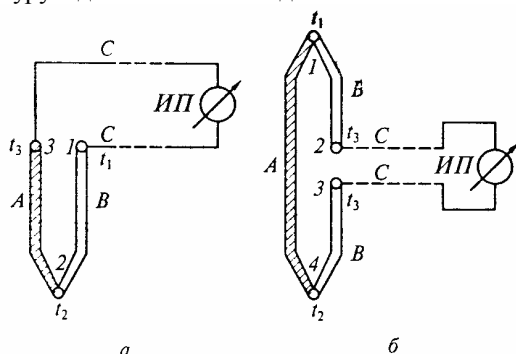


Рис. 5.2. Схемы включения измерительного прибора:

1 и 3 — холодный спай; 2 — горячий спай;

б: 1 — холодный спай; 2 и 3 — нейтральный спай; 4 — горячий спай

Физические тела характеризуются либо непрерывным спектром излучения (твердые и жидкие вещества), либо избирательным (газы). Участок спектра в интервале длин волн 0,02...0,4 мкм соответствует ультрафиолетовому излучению, участок 0,4... 0,76 мкм — видимому излучению, участок 0,76...400 мкм — инфракрасному излучению. Интегральное излучение — это суммарное излучение, испускаемое телом во всем спектре длин волн.

Монохроматическим называют излучение, испускаемое при определенной длине волны.

На основании законов излучения разработаны пирометры следующих типов:

- суммарного (полного) излучения, в которых измеряется полная энергия излучения;

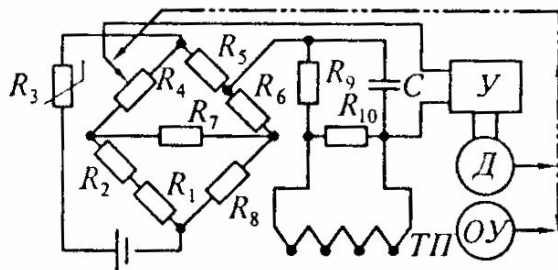


Рис. 5.3. Принципиальная схема подключения термоэлектрического термометра:

$R_1...R_8$ – сопротивления компенсационного моста;
 R_1, R_3 – терморезисторы; R_9, R_{10} – сопротивления делителя напряжения;
 ТП – термопары; C – конденсатор; $У$ – усилитель; $Д$ – двигатель;
 ОУ – отсчетное устройство излучения

- частичного излучения (квазимонохроматические), в которых измеряется энергия в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;
- спектрального распределения, в которых измеряется интенсивность излучения фиксированных участков спектра.

В пирометрах полного излучения оценивается не менее 90 % суммарного потока излучения источника. При измерении температуры реального тела пирометры этого типа показывают не действительную, а так называемую радиационную температуру тела. Поэтому эти пирометры называют *радиационными*. При известном суммарном коэффициенте черноты тела возможен пересчет с радиационной температуры тела на его действительную температуру. Исходя из этого, пирометры полного излучения удобно использовать при измерениях разностей температур в неизменных условиях наблюдения в диапазоне от 100...3500 °С. Основная допустимая погрешность в технических пирометрах возрастает с увеличением верхнего предела измерения температуры. Так, для 1000 °С – ± 12 %.

В *радиационном пирометре* (рис. 5.4) лучи нагретого тела поступают на линзу 1, которая направляет их через диафрагму 2 на приемник излучения 3. Приемник излучения состоит из большого числа термопар (термобатарей), горячие спаи которых выполнены в виде секторных тонких пластинок. Сигнал с термопар, соединенных последовательно, подается на отсчетное устройство ОУ. Через окуляр 4 с фильтром 5 проводится наведение пирометра на объект измерения.

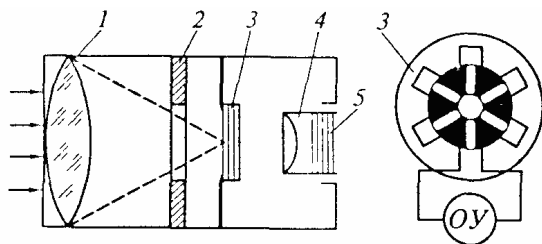


Рис. 5.4. Схема радиационного пирометра:
1 – линза; 2 – диафрагма; 3 – приемник излучения; 4 – окуляр;
5 – фильтр; ОУ – отсчетное устройство

Они подразделяются на электрические (термобатареи, болометры, тепловые индикаторы, пироэлектрические кристаллы), пневматические (детектор Голея) и оптические (жидкие кристаллы). Наибольшая чувствительность ($10^5 \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$) у пневматических приемников. У электрических она составляет от 10^{-4} до $10^{-3} \text{ В} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Приемники полного излучения отличаются тем, что их спектральная чувствительность постоянна в широком диапазоне длин волн от дальней инфракрасной области до ближней ультрафиолетовой. Для увеличения поглощательной способности чувствительные поверхности приемников излучения окрашивают в черный цвет. Для уменьшения теплоотвода в среду приемник помещают и вакуумированные или газонаполненные корпуса.

5.2. Измерение и контроль электрических величин

5.2.1. Средства и единицы измерения

Развитие измерительной техники все шире идет по пути использования электрических методов измерений вне зависимости от того, какие параметры, электрические или неэлектрические предполагается измерять. Поэтому процесс измерений можно представить в виде блок-схемы, состоящей из блока преобразования, обеспечивающего преобразование практически любой физической величины, подлежащей измерению, в электрическую, которая может быть уже измерена электрическим прибором (рис. 5.5, а). Такой преобразователь часто называют просто *датчиком*. Удобнее всего проводить измерения на выходе такого преобразователя с помощью прибора для измерения напряжения или тока. Например, для измерения частоты вращения двигателя внутреннего сгорания автомобиля используют преобразователь, представляющий собой генератор постоянного напряжения, величина ко-

торого прямо пропорциональна частоте вращения, и тот прибор – вольтметр, который подключается к выходу генератора, может быть непосредственно отградуирован в единицах частоты вращения. В некоторых случаях конструкция преобразователя может быть двухступенчатой (рис. 5.5, б). Первая ступень преобразовывает входную величину, которая непосредственно не может быть преобразована в напряжение или ток, в другую физическую величину, которая уже легко может быть преобразована в напряжение или ток.

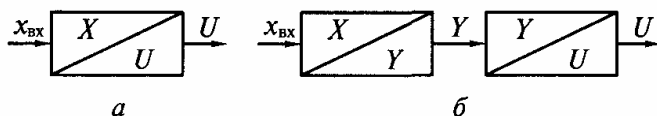


Рис. 5.5. Схемы преобразователей:
а – одноступенчатого; б – двухступенчатого

Рассмотрим электрические величины и единицы измерения, с которыми чаще всего приходится иметь дело. В табл. 5.1 приведены физические величины, наименование единиц и их условные обозначения как русские, так и международные. Кратные и дольные единицы электрических γ величин образуются в соответствии с общим правилом путем добавления соответствующих приставок к основным единицам.

Измерение большинства электрических величин в той или иной степени связано с измерением напряжения или тока.

На рис. 5.6 показана наиболее часто используемая схема магнитоэлектрического прибора.

Таблица 5.1

Электрические величины

Физическая величина	Наименование единицы	Обозначение единицы	
		международное	русское
Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, электродвижущая сила	вольт	V	В
Сила тока	ампер	A	А
Активная мощность	ватт	W	Вт
Количество электричества (электрический заряд)	кулон	C	Кл
Электрическое сопротивление	ом	Ω	Ом
Электрическая емкость	фарада	F	Ф

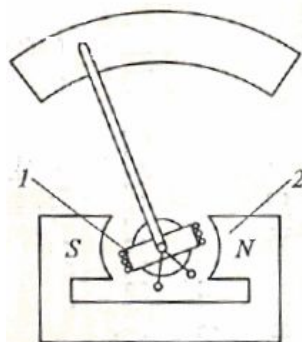


Рис. 5.6. Конструкция прибора магнитоэлектрической системы:
1 – рамка с обмоткой; 2 – магнит

Рассмотрим наиболее часто используемые для этой цели измерительные приборы. Один из них – магнитоэлектрический прибор (рис. 5.6). Для простоты на рисунке не показана спиральная пружина, создающая противодействующий момент.

Прибор представляет собой неподвижный постоянный магнит 2, в поле которого располагается рамка с обмоткой 1. При протекании по катушке тока в соответствии с физическими законами возникают силы, действующие на витки катушки, находящейся в магнитном поле. Так как силы, действующие на витки противоположных сторон катушки из-за противоположного направления тока в них направлены в разные стороны, то создается вращающий момент, подвижная часть с рамкой поворачивается и стрелочный указатель показывает величину силы тока, проходящего через рамку, или величину приложенного к обмотке рамки напряжения.

Теория такого магнитоэлектрического прибора показывает, что угол отклонения стрелки α оказывается прямо пропорциональным напряжению или току:

$$\alpha = k_1 U; \quad \alpha = k_2 I. \quad (5.1)$$

k_1 и k_2 – коэффициенты пропорциональности, зависящие от конструктивных параметров прибора.

К достоинствам магнитоэлектрического прибора можно отнести:

- достаточно высокую точность;
- очень высокую чувствительность (можно измерять до миллионов долей вольта магнитоэлектрическими гальванометрами);

- отсутствие влияния внешних магнитных полей (т. к. магнитное поле своего постоянного магнита достаточно сильное);
- линейность шкалы (т. е. шкала равномерная).

В то же время прибор не лишен и недостатков, основной из которых – невозможность измерения переменных напряжений и токов.

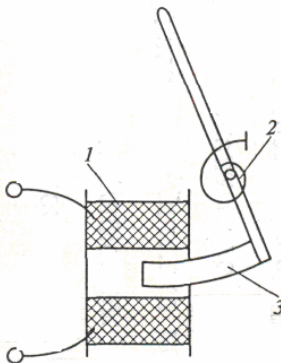


Рис. 5.7. Конструкция прибора электромагнитной системы:
1 – неподвижная катушка; 2 – пружина; 3 – ферромагнитный сердечник

Магнитоэлектрический прибор находит самое широкое применение в различных схемах измерений и в качестве конечного индикатора на выходе преобразователей.

Широкое применение в промышленности нашел прибор электромагнитной системы (рис. 5.7). Это один из наиболее простых и дешевых приборов, обладающий к тому же большой перегрузочной способностью и большой механической прочностью. Конструктивно он состоит из неподвижной катушки 1 и ферромагнитного сердечника 3, который под действием магнитного поля катушки при подаче на нее напряжения втягивается внутрь катушки. Ферромагнитный сердечник 3 связан со стрелкой прибора, а т. к. магнитное поле тем сильнее, чем больший ток проходит по виткам неподвижной катушки 1, то отклонение стрелки будет зависеть от величины приложенного напряжения или проходящего через катушку тока. Втягивание ферромагнитного сердечника 3 внутрь катушки не зависит от направления тока в ней, следовательно, прибор может работать как на постоянном, так и на переменном токе. К сожалению, электромагнитный прибор обладает и рядом недостатков. Чувствительность его невелика, точность также мала, особенно при работе на постоянном токе. Кроме того, у него не-

линейная шкала, что в какой-то мере затрудняет считывание результатов измерения.

Несмотря на эти недостатки, прибор электромагнитной системы наиболее широко используется для непосредственного измерения напряжения и токов в цехах, на транспорте, а также в случаях, где требуется высокая надежность работы приборов в условиях вибраций, тряски и даже ударов.

Все рассмотренные измерительные приборы относятся к так называемому аналоговому типу, имеющему подвижную индикаторную часть в виде стрелки. Развитие электроники позволило не только улучшить характеристики измерительных приборов, но и изменить их качественно, снабдив цифровым индикатором результатов измерений. Такие приборы обычно называются цифровыми или дискретного типа.

Рассмотрим электронный прибор с аналоговым индикатором – электронный вольтметр (рис. 5.8).

На его входе имеется входное устройство, которое обеспечивает очень большое входное сопротивление вольтметра, практически не нагружающего цепь измерения. В отличие от электромеханических приборов, электронные для своей работы не нуждаются в энергии измеряемой цепи, т. к. для своей работы используют или электрическую сеть, или автономные источники питания. Усиление входного сигнала может осуществляться как на переменном, так и на постоянном токе при измерении переменного напряжения или только на постоянном токе при измерении постоянного напряжения. При измерении переменного напряжения для обеспечения работы усилителя постоянного тока применяется выпрямитель, часто именуемый детектором. На выходе прибора устанавливается обычный магнитоэлектрический прибор, по которому производится отсчет результатов измерений.

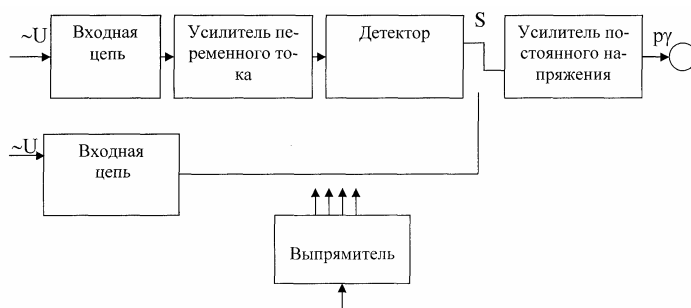


Рис. 5.8. Схема аналогового электронного вольтметра

Цифровой вольтметр (рис. 5.9) после усиления входного сигнала аналоговыми усилителями использует аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий аналоговый сигнал в цифры, которые могут быть поданы на цифровой индикатор, где результаты измерения отображаются непосредственно в виде цифр. Еще сравнительно недавно цифровые приборы были большими по габаритным размерам, включали много транзисторов и других элементов схем. Развитие микроэлектроники, создание новых микросхем позволили существенно уменьшить габаритные размеры, схему сложность и стоимость цифровых приборов. Например, АЦП представляет собой небольшую микросхему.

Необходимо иметь в виду, что цифровые приборы неудобны при измерении быстроменяющихся величин, т. к. мелькание различных цифр на индикаторе не дает понять характер процессов, контролируемых измерительной аппаратурой. В то же время цифровые приборы позволяют очень просто вводить результаты измерений в компьютеры, которые все шире используются в измерительных комплексах.



Рис. 5.9. Схема цифрового вольтметра

5.5.2. Методика измерения в электрических цепях

Измерение постоянного и переменного напряжения. Измерение как постоянного, так и переменного напряжения может проводиться непосредственно вольтметрами, рассчитанными для работы соответствующего типа напряжения. В тех случаях, когда необходимо измерить напряжение больше того, на которое рассчитан вольтметр, необходимо последовательно с ним включить добавочный резистор. Тогда часть измеряемого напряжения будет падать на добавочный резистор, а часть – на прибор. Подбирая величину сопротивления добавочного резистора, можно в широких пределах расширять возможности измерения больших напряжений. Если известно сопротивление вольтметра $R_{\text{пр}}$ и выбран коэффициент расширения пределов расширения, то

$$n = U_x / U_{np} \quad (5.2)$$

где U_x – максимальное напряжение на входе схемы, подлежащее измерению; U_{np} – максимальные пределы измерения непосредственно вольтметром.

Величина сопротивления добавочного резистора может быть найдена по следующей формуле:

$$R_{доп} = R_{np}(n - 1), \quad (5.3)$$

Обычно для удобства проведения отсчетов коэффициент n выбирают кратным 2; 5 или 10.

Для измерения высоких переменных напряжений могут быть использованы так называемые измерительные трансформаторы напряжения.

Они представляют собой понижающие трансформаторы, т. е. такие, у которых число витков вторичной обмотки W_2 , к которой подключается вольтметр, меньше числа витков W_1 первичной обмотки. Коэффициент расширения пределов измерения $n = W_1/W_2$.

Измерение тока можно производить непосредственно амперметром, включенным в разрыв измеряемой цепи. При необходимости расширить пределы измерения амперметра необходимо параллельно амперметру включить резистор, который чаще всего называют просто *шунтом*. Тогда через амперметр будет проходить только часть тока, остальная – через шунт. Так как сопротивление амперметров обычно небольшое, то для существенного расширения пределов измерения сопротивление шунта должно быть очень небольшим. Обычно это доли Ома. Существуют формулы для расчета сопротивления шунта, но обычно на практике приходится вручную подгонять его сопротивление, контролируя ток эталонным амперметром.

Для измерения больших переменных токов часто используют измерительные трансформаторы токов.

Измерение сопротивлений. Часто при работе с электрическими установками или при наладке электронных схем необходимо производить измерение различных сопротивлений. Простейший способ измерения сопротивлений заключается в использовании двух измерительных приборов: амперметра и вольтметра. С их помощью измеряют напряжение и ток в сопротивлении R , подключенном к источнику питания, и по закону Ома находят величину искомого сопротивления:

$$R = U/I \cdot \quad (5.4)$$

Однако этот способ измерения сопротивлений не позволяет получить результаты измерения с высокой точностью, т. к. на результаты измерения оказывают влияние собственные внутренние сопротивления амперметра и вольтметра.

Для измерения сопротивления используются специальные приборы – омметры (для больших сопротивлений до 100 МОм – мегомметры).

Измерение малых сопротивлений (меньше 1 Ома), а также измерение других сопротивлений в широком диапазоне значений с высокой точностью могут производиться с помощью электрических мостов.

6. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ДАВЛЕНИЯ В РАЗРЕЖЕНИИ

6.1. Единицы измерения и классификация приборов

Давлением называют отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. Давление – одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние веществ. Давлением во многом определяется ход технологического процесса, состояние технологических аппаратов и режимы их функционирования. С задачей измерения давления приходится сталкиваться при измерениях некоторых технологических параметров, например, расхода газа или пара, при изменяющихся термодинамических параметрах, уровня жидкости и др.

Различают следующие виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум (разрежение).

Атмосферное (барометрическое) давление – давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы.

Абсолютное давление – давление, отсчитанное от абсолютного нуля. За начало отсчета абсолютного давления принимают давление внутри сосуда, из которого полностью откачан воздух.

Избыточное давление – разность между абсолютным и барометрическим.

Вакуум (разрежение) – разность между барометрическим и абсолютным давлением.

ГОСТ «Международная система единиц» предусматривает универсальную единицу давления – Ньютон на кратный метр (Н/м^2) – давление, которое испытывает 1 м^2 плоской поверхности под действием равномерно распределенной, перпендикулярной к этой поверхности силы в 1 Н. Квадратными и дольными единицами давления являются килоньютон на метр (кН/м^2), меганьютон на квадратный метр (М Н/м^2) и др.

В технических измерениях в настоящее время преимущественно применяют следующие внесистемные единицы давления.

1. Техническая атмосфера (*ат*) или килограмм-сила на квадратный сантиметр (кгс/см^2 или кг/см^2), равная $9,80665 \times 10 \text{ Н/м}^2$.

2. Миллиметр водяного столба (мм вод.ст.), равный $1 \times 10 \text{ ат}$, или $9,80665 \text{ н/м}^2$.

3. Миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), равный $1/760$ физической атмосферы (*ат*) $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ н/м}^2$.

4. Бар (бар), равный 10 Н/м^2 , или $1,01972 \text{ ат}$. ($1,02 \text{ ат}$), и его дольные единицы миллибар ($1 \text{ мбар} = 1 \times 10 \text{ бар} = 100 \text{ Н/м}^2 = 0,750062 \text{ мм рт.ст}$) и микробар ($1 \text{ мкбар} = 0,1 \text{ н/м}^2$).

В некоторых случаях давление измеряют в физических атмосферах ($\text{атм} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101\,325 \text{ Н/м}^2 = 1,0332 \text{ кг/см}^2$).

В термодинамике, физике, физической химии и других отраслях науки применяется в качестве единицы давления килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м^2 , м, кг/м^2);

$$1 \text{ кг/м}^2 = 1 \text{ мм вод.ст.} = 1 \times 10 \text{ кг/см}^2 = 9,80665 \text{ Н/м}^2;$$

$$1 \text{ дин/см}^2 = 0,1 \text{ н/м}^2 = 1,02 \times 10 \text{ кг/см}^2.$$

В качестве единицы давления в нормальных физических условиях (нормального давления) условно принимается давление атмосферного воздуха, равное 760 мм рт.ст. , или $101\,325 \text{ н/м}^2$ (точно).

Широкое использование давления, его перепада и разрежения в технологических процессах вызывает необходимость применять разнообразные методы и средства измерения и контроля давления.

Методы измерения давления основаны на сравнении сил измеряемого давления с силами:

- давления столба жидкости (ртути, воды) соответствующей высоты;
- развиваемыми при деформации упругих элементов (пружин, мембран, манометрических и aneroidных коробок, сильфонов и манометрических трубок);
- тяжести грузов;
- упругими силами, возникающими при деформации некоторых материалов и вызывающими эффекты.

Классификация приборов для измерения давления

Приборы для измерения давления подразделяются на группы по различным признакам.

По характеру измеряемой величины приборы делятся на следующие группы:

1. Приборы для измерения атмосферного давления ($P_{\text{ат}}$) – барометры.
2. Приборы для измерения разности абсолютного и атмосферного давлений, т. е. избыточного давления ($P_{\text{и}}$) и вакуума ($P_{\text{в}}$). Приборы, измеряющие избыточное давление, называют *манометрами*. Приборы, измеряющие вакуум, называются *вакуумметрами*.

Приборы, измеряющие как избыточное давление, так и вакуум, называют *мановакуумметрами*.

3. Приборы для измерения абсолютного давления ($P_{\text{а}}$) – манометры абсолютного давления.

Абсолютное давление измеряется в технике обычно с помощью двух приборов – манометров и барометра, если измеряемое давление больше атмосферного $P_{\text{а}} = P_{\text{ат}} = P_{\text{и}}$, барометра и вакуумметра, если

измеряемое давление меньше специальных физических измерений малых абсолютных давлений.

4. Приборы для измерения разности давлений – дифференциальные манометры.

По принципу действия приборы делятся на жидкостные, пружинные, грузопоршневые, электрические и комбинированные.

К жидкостным относятся манометры, основанные на гидростатическом принципе действия, заключающемся в том, что измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости, высота которого служит мерой давления.

В пружинных приборах действию измеряемого давления подвергается упругий элемент (трубка, мембрана, сильфон). Под действием давления возникает деформация упругого элемента, величина которой служит мерой давления.

В грузопоршневых приборах измеряемое давление, действующее на поршень, уравнивается приложенной к нему внешней силой (обычно грузом), которая и служит мерой давления.

Действие электрических приборов основано на изменении под давлением электрических свойств некоторых материалов (например, зависимость омического сопротивления некоторых сплавов от давления среды, окружающей проводник, используется при измерении высоких давлений; появление электрических зарядов на поверхности кристаллического диэлектрика при сжатии и растяжении кристалла используется при измерении быстропеременных давлений).

К комбинированным приборам относятся приборы, принцип действия которых носит смешанный характер (например, электромеханические приборы).

Манометры делятся на классы по точности. Класс точности определяется величиной максимальной допустимой случайной погрешности, выраженной в процентах предельного значения шкалы прибора.

В настоящее время установлены следующие классы точности приборов для измерения давления: 0,005; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 1; 2; 2,5; 4; 6,0. Приборы классов точности 0,35–6 используются в качестве рабочих. Приборы высоких классов точности 0,005–0,35 используются как образцовые. Они применяются при измерениях, требующих повышенной точности, и для поверки рабочих приборов.

6.2. Жидкостные приборы

Действие жидкостных средств измерений основано на гидростатическом принципе, при котором измеряемое давление уравнивается

ется давлением столба затворной (рабочей) жидкости. Разница уровней в зависимости от плотности является мерой давления.

Простейшим прибором для измерения давления или разности давлений является двухтрубный (или U-образный) манометр (рис. 6.1), представляющий собой согнутую стеклянную трубку, заполненную рабочей жидкостью (ртутью или водой), прикрепленную к панели со шкалой. Один конец трубки соединяется с атмосферой, а другой подключается к объекту, где измеряется давление. Его значение определяется из выражения

$$p = h\rho g, \quad (6.1)$$

где p – измеряемое давление, Па; h – разность уровней жидкости, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Верхний предел измерения двухтрубных манометров составляет 1...10 кПа при приведенной погрешности измерения 0,2...2 %. Точность измерения давления этим средством будет определяться точностью отсчета величины h , точностью определения плотности рабочей жидкости ρ и не зависеть от сечения трубки.

Более удобным средством измерения давления является однотрубный (чашечный) манометр (рис. 6.3), в котором одна из трубок заменена сосудом, диаметр его, как правило, в 20 раз больше диаметра трубки. Принцип действия манометра аналогичен рассмотренному выше, однако давление или разрежение будет определяться по формуле

$$p = h\rho g \left(1 + d^2/D^2\right) = h\rho g (1 + f/F), \quad (6.2)$$

где d , D – диаметр трубки и широкого сосуда, соответственно, м; f , F – сечение трубки и широкого сосуда, м².

Так как соотношение диаметров или сечений трубки и сосуда значительны, понижением уровня h_2 при изменении давления можно пренебречь и отсчет только по стеклянной трубке, т. е. по h_1 .

Однотрубные манометры имеют верхний предел измерения 1,6...10 кПа, приведенная погрешность измерения составляет 0,25...0,4 %.

На рис. 6.4, в показан однотрубный микроманометр, основанный на том же принципе, который применяется для измерения малых величин давления (до 2 кПа). В этом манометре стеклянная трубка расположена под углом α к горизонту. При этом точность измерения увеличивается в несколько раз.

Двухтрубный манометр

Наиболее простым, распространенным и вместе с тем точным прибором является U-образный манометр (рис. 6.1). Этот манометр представляет собой согнутую в виде буквы U стеклянную трубку, заполненную жидкостью и прикрепленную к доске, на которой имеется шкала для отсчетов. Один конец трубки сообщается с атмосферой, другой подключается к измеряемой среде.

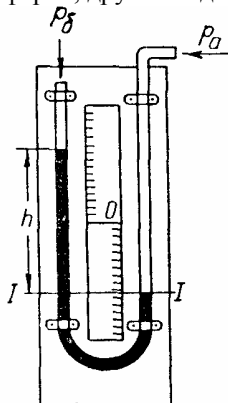


Рис. 6.1. U-образный манометр

Рабочей жидкостью может быть ртуть, вода.

Если оба конца трубки сообщаются с атмосферой, то на основании закона сообщающихся сосудов жидкость в обеих трубках будет находиться на одном уровне. Это положение жидкости в трубках при отсутствии давления должно совпадать с нулевой отметкой шкалы.

Если правый конец трубки соединить с замкнутым сосудом, в котором измеряют давление (пусть это давление больше атмосферного), то жидкость в этом колене опустится, а в левом – поднимется и займет положение, соответствующее равновесию между весом столба жидкости в левом колене и давлением в замкнутом сосуде.

Однотрубный манометр

Однотрубный (чашечный) манометр представляет собой разновидность U-образного манометра, у которого одно колено трубки выполнено в виде сосуда с сечением, значительно большим, чем сечение второго колена (рис. 6.2). Манометр заполняют ртутью через широкий сосуд 1 до тех пор, пока мениск не поднимется в трубке 2 до нулевой отметки. Измеряемое давление, действуя на поверхность рабочей жидкости в широком сосуде, заставляет ее подниматься по измерительной трубке 2.

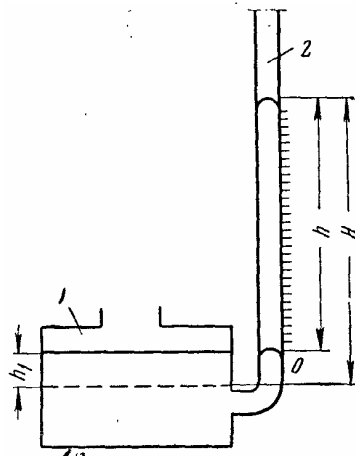


Рис. 6.2. Однотрубный манометр

При измерениях вакуума пространство, в котором имеется разрежение, соединяют с трубкой 2. Так как в этот момент давление над ртутью в трубке 2 меньше атмосферного, а на поверхность ртути в сосуде 1 действует атмосферное давление, ртуть в измерительной трубке будет подниматься до тех пор, пока вес столба ртути в трубке 2 не уравнивает разность между атмосферным давлением и вакуумом. Таким образом, в этом приборе, как и в U-образном, давление или разрежение будет определяться равенством

$$p = h\gamma \quad (6.1)$$

Если в U-образном манометре давление определяется по разности уровней в двух трубках, то в чашечном давление отсчитывается по одной трубке, что уменьшает погрешность отсчета.

Однако в чашечном манометре существует погрешность из-за понижения уровня в сосуде 1.

Погрешность измерения определяется величиной $\frac{f}{F}$. Конструируют однотрубные манометры так, чтобы отношение $\frac{f}{F}$ было возможно меньшим.

При обычных измерениях, где не требуется высокая точность, поправкой $\frac{f}{F}$, как величиной весьма малой, пренебрегают.

Наклонный манометр

Измерение низких давлений или разрежений порядка нескольких миллиметров или десятков миллиметров обычными U-образными или чашечными мановакуумметрами дает большую погрешность из-за неточного отсчета.

Для этой цели применяют специальные приборы – микроманометры. Простейшим микроманометром является наклонный однотрубный (рис. 6.3). Микроманометр имеет сосуд 2, укрепленный на деревянной колодке 1, который соединен с измерительной трубкой 3, наклоненной под некоторым углом α . Вдоль наклонной трубки расположена шкала с делениями в мм вод. ст. или в мм рт. ст. Прибор снабжен уровнем 4 для правильной установки.

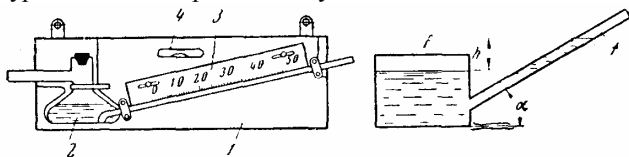


Рис. 6.3. Наклонный однотрубный манометр

Замкнутое пространство, где измеряется разрежение, соединяют с измерительной трубкой. При измерении давления замкнутое пространство соединяют с сосудом. Когда измеряют разность давлений, замкнутое пространство с большим давлением присоединяют к сосуду, с меньшим – к измерительной трубке. Таким образом, этот прибор может использоваться как манометр, вакуумметр и дифференциальный манометр.

По конструкции микроманометр по существу представляет собой чашечный манометр, следовательно, давление, определяемое им, может быть подсчитано по формуле 6.5.

Высоту h в этом случае можно определить, зная угол наклона трубки α (рис. 6.4)

$$h = n \sin \alpha, \quad (6.2)$$

где n – число миллиметров по шкале, указывающих длину наклонного столба жидкости.

Подставив значение h из (6.11) в (6.10), получаем

$$p = \gamma \sin \alpha \left(\frac{f}{F} \right). \quad (6.3)$$

Отношением $\frac{f}{F}$, как величиной весьма малой, можно пренебречь.

Тогда

$$p = \gamma \sin \alpha. \quad (6.4)$$

Из равенства (6.4) видно, что чем меньше угол α , тем меньше предел измерения прибора, тем более растянуты деления. В практике угол наклона трубки α не делают менее 15° , т. к. при малых значениях угла мениск вытянут и размыт, что может быть причиной неточного отсчета.

6.3. Поршневые манометры

Поршневые манометры относятся к числу наиболее точных приборов для измерения давления, поэтому они применяются главным образом для поверки и градуировки приборов. Схема поршневого манометра приведена на рис. 6.4.

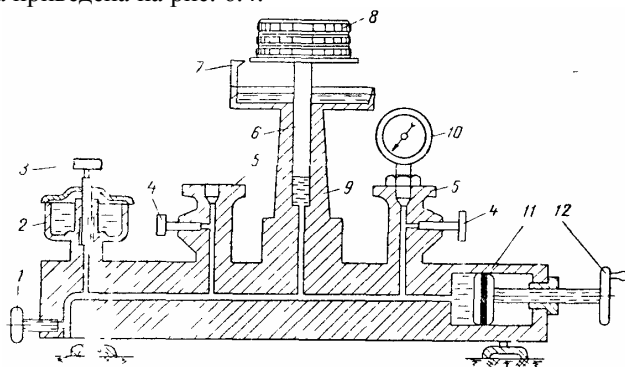


Рис. 6.4. Поршневой манометр

Грузовая колонка 9 в центральной части имеет цилиндрический полированный канал, в котором перемещается штوك (поршень) 6, несущий на себе тарелку с грузами 8.

Канал колонки 9 соединен с прессом червячного типа, имеющим поршень 11. Кроме того, он соединен каналами со штуцерами 5, служащими для присоединения поверяемых манометров 10. Каналы колонки и штуцеров имеют игольчатые вентили 4, предназначенные для перекрытия. Пользуясь вентилем 1, сливают рабочую жидкость.

Перед началом работы грузовой манометр устанавливают по уровню. Затем открывают вентиль 5 и из емкости 2 заполняют рабочей жидкостью всю гидравлическую систему прибора. При ее заполнении одновременно вывертывают поршень 11, вращая маховик 12 против часовой стрелки. При вывернутом до отказа поршне 11 часть жидкости должна остаться в емкости 2. Рабочей жидкостью обычно является минеральное масло небольшой вязкости. После заполнения прибора жидкостью вентиль 3 закрывают. Затем, вращая маховик 12, добиваются такого положения, при котором приподнятая давлением масла в системе тарелка с грузами заняла бы место против указателя 7. На этом уровне поршень с грузами должен находиться во время проверки. С целью уменьшения трения поршня 6 в цилиндре в процессе измерения ему придают вращательное движение, давая тарелке с грузами легкие толчки рукою.

Как видно из устройства поршневого манометра, принцип действия его основан на уравнивании сил, создаваемых в гидравлической системе прибора, измеряемым давлением, грузами. О величине измеряемого давления судят по величине уравнивающих грузов.

На поршень, свободно двигающийся в цилиндре, действуют две силы: сила от давления жидкости, с одной стороны, и сила тяжести положенных на поршень грузов, с другой. При равновесии поршня давление

$$p = \frac{G + G_1}{f}, \quad (6.5)$$

где G – сила тяжести поршня; G_1 – сила тяжести грузов, положенных на поршень; f – площадь поперечного сечения поршня.

6.4. Пружинные манометры и вакуумметры

Высокая точность, простота конструкции, надежность и низкая стоимость являются основными факторами, обуславливающими широкое распространение деформационных приборов для измерения давления в промышленности.

Эти приборы предназначены для измерения избыточного давления и разрежения неагрессивных жидких и газообразных сред.

Приборы этого типа выпускаются только показывающие в обыкновенном, виброустойчивом, антикоррозионном, пыле-, брызго- и взрывозащищенном исполнениях.

Деформационные средства измерения давления основаны на уравнивании силы, создаваемой давлением или вакуумом контролируемой среды на чувствительный элемент, силами упругих де-

формаций различного рода упругих элементов. Эта деформация в виде линейных или угловых перемещений передается регистрирующему устройству (показывающему или самопишущему) или преобразуется в электрический (пневматический) сигнал для дистанционной передачи.

В качестве чувствительных элементов используют одновитковые трубчатые пружины (рис. 6.5, а), многовитковые трубчатые пружины (рис. 6.5, б), упругие мембраны (рис. 6.5, в), упругие мембранные коробки (рис. 6.5, г, д), двойные упругие мембранные коробки (рис. 6.5, е, ж), пружинно-мембранные с гибкой мембраной (рис. 6.5, з), сильфонные (рис. 6.5, и) и пружинно-сильфонные (рис. 6.5, к).

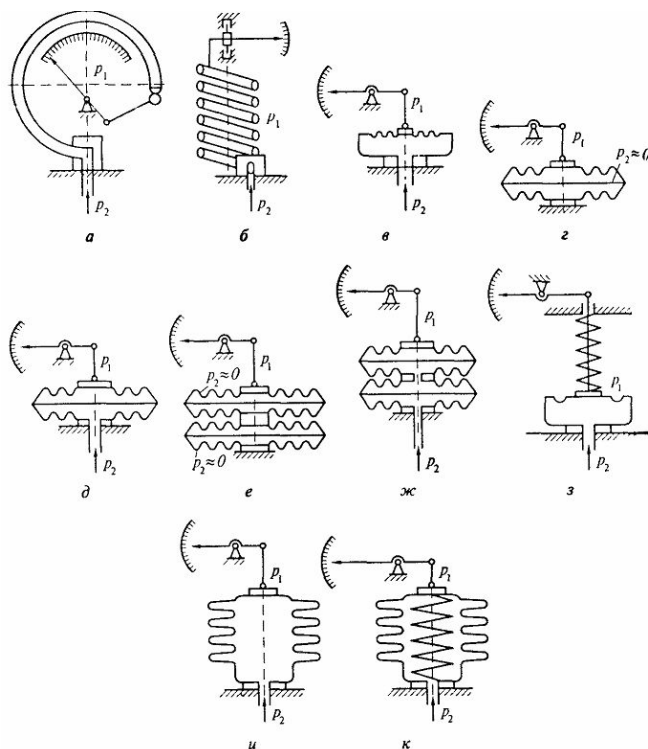


Рис. 6.5. Деформационные чувствительные элементы средств измерения давления

Для изготовления мембран, сильфонов и трубчатых пружин применяются бронза, латунь, хромоникелевые сплавы, отличающиеся дос-

таточно высокой упругостью, антикоррозийностью, малой зависимостью параметров от изменения температуры.

Рассмотрим подробнее некоторые деформационные средства измерения давления.

Мембранные приборы применяются для измерения небольших давлений (до 40 кПа) нейтральных газовых сред. Класс точности данных приборов – 2,5.

На рис. 6.7 показана конструкция мембранного вакуумметра с профильной шкалой от 250 до 25 000 Па. Чувствительным элементом служит мембранная коробка 6, соединенная с измеряемой средой с помощью трубки 12. Мембрана прикреплена к корпусу прибора с помощью штуцера 13. Изменение давления измеряемой среды вызывает соответствующее изменение прогиба мембранной коробки 6. При этом поводок 9, прикрепленный к верхней части мембранной коробки 6, поворачивает рычаг 7, установленный на оси 8. Для увеличения жесткости упругой системы ось 8 закреплена на плоской пружине 10. Поворот рычага 7 вызывает перемещение тяги 14 и рычага 1, установленного на оси 4. На это же оси с помощью стопорного винта 2 закреплена указательная стрелка 5 с противовесом 3. Конечная указательной стрелки перемещается вдоль горизонтальной профильной шкалы. Спиральная пружина 15 служит для устранения влияния зазоров в сочленениях рычажного механизма. Для установки стрелки на начальную отметку шкалы служит винт 11 корректора нуля.

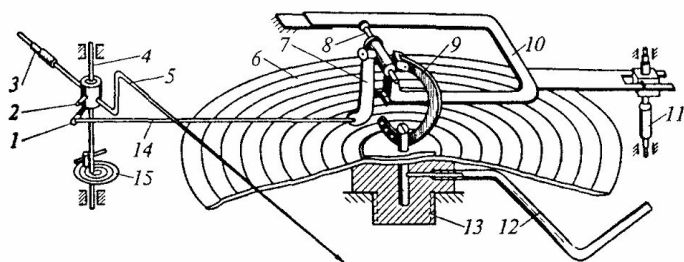


Рис. 6.6. Конструкция мембранного вакуумметра с профильной шкалой:

- 1 и 7 – рычаг; 2 – стопорный винт; 3 – противовес; 4 и 8 – ось;
5 – указательная стрелка; 6 – мембранная коробка; 9 – поводок;
10 – плоская пружина; 11 – ВНТ корректора нуля; 12 – трубка;
13 – штуцер; 14 – тяга; 15 – спиральная пружина

Трубчато-пружинные приборы принадлежат к числу наиболее распространенных манометров, вакуумметров и мановакуумметров.

Трубчатая пружина представляет собой тонкостенную, согнутую по дуге окружности, трубку (одно- или многovitkovую) с запаянным одним концом, которая изготавливается из медных сплавов или нержавеющей стали. При увеличении или уменьшении давления внутри трубки пружина раскручивается или скручивается на определенный угол. На рис. 6.7. представлено устройство простейшего пружинного манометра. Оно состоит из корпуса 1; полая трубка 2, выполненная в форме согнутой по кругу на угол 270° с поперечным овальным сечением, с одной стороны свободна и наглухо закрыта, а с другой – впаивана в держатель, который присоединен к источнику измеряемого давления при помощи штуцера 8. Закрытый конец трубки поводком 7 соединен с зубчатым сектором 6, который зацеплен с шестерней 5, установленной на одной оси с показывающей стрелкой 4. Под действием избыточного давления трубка разгибается, ее свободный конец перемещается и тянет поводок 7, который поворачивает связанный с ним зубчатый сектор 6. Последний вращает шестерню 5 и стрелку 4, указывающую по шкале 3 величину измеряемого давления. Для устранения мертвого хода между зубьями сектора и шестерни применена спиральная пружина 9.

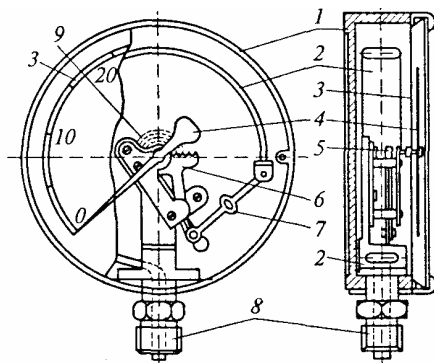


Рис. 6.7. Устройство пружинного манометра:
 1 – корпус; 2 – полая трубка; 3 – шкала; 4 – стрелка; 5 – шестерня;
 6 – зубчатый сектор; 7 – поводок; 8 – штуцер; 9 – пружина

Манометры рассмотренного типа выпускаются для верхних пределов измерения 60... 160 кПа. Вакуумметры выпускаются со шкалой 0... 100 кПа. Мановакуумметры имеют пределы измерений: от -100 кПа до +(60 кПа...2,4 МПа). Класс точности для рабочих манометров 0,6...4, для образцовых – 0,16; 0,25; 0,4.

Развитие полупроводниковой техники и микроэлектроники позволяет разрабатывать и создавать более совершенные средства измерения давления в широких диапазонах величин. Действие приборов этой группы основано на свойстве некоторых материалов изменять свои электрические параметры под действием давления.

Пьезоэлектрические манометры применяют при измерении пульсирующего с высокой частотой давления в механизмах с допустимой нагрузкой на чувствительный элемент до $8 \cdot 10^3$ ГПа. Чувствительным элементом в пьезоэлектрических манометрах, преобразующим механические напряжения в колебания электрического тока, являются пластины цилиндрической или прямоугольной формы толщиной в несколько миллиметров из кварца, титаната бария или керамики типа ЦТС (цирконат-титанат свинца).

Конструкция преобразователя пьезоэлектрического манометра показана на рис. 6.8. Измеряемое давление через мембрану 7 действует на пьезоэлементы 8 и 9, расположенные так, что на их внутренних гранях, соприкасающихся с металлической прокладкой 4, возникают одноименные заряды. Потенциал с внутренних граней пластинок снимается изолированным проводником 3, присоединенным к прокладке 4, а с внешних граней пьезоэлементов – через корпус и металлические прокладки 2 и 5, мембрану 7 и шарик 10, крышку 1. Штуцер 6, зажимающий мембрану 7, служит для присоединения чувствительного элемента к объекту измерения.

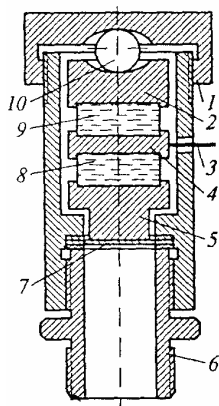


Рис. 6.8. Конструкция преобразователя пьезоэлектрического манометра:
1 – крышка; 2, 4 и 5 – металлическая, прокладка;
3 – проводник; 6 – штуцер; 7 – мембрана;
8 и 9 – пьезоэлемент; 10 – шарик

Величина электрического заряда будет прямо пропорциональна давлению:

$$q = kpS, \quad (6.6)$$

где q – заряд, Кл; k – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н; p – давление, Па; S – площадь поверхности пластин, м².

Измерение заряда выполняется электронной схемой.

Тензометрические манометры имеют малые габаритные размеры, простое устройство, высокую точность и надежность в работе. Верхний предел показаний – 0,1 ... 40 МПа, класс точности – 0,6; 1 и 1,5. Применяются в сложных производственных условиях.

В качестве чувствительного элемента в тензометрических манометрах применяются тензорезисторы, принцип действия которых основан на изменении сопротивления под действием деформации. Конструкция тензометрического манометра приведена на рис. 6.9. Манометр имеет цилиндрический корпус 4, образующий в верхней части упругую мембрану, а в нижней – штуцер для подвода измеряемого давления p . К мембране припаяна круглая сапфировая пластина 1, на поверхность которой нанесены тонкопленочные полупроводниковые тензорезисторы $R_1...R_4$ из монокристаллического кремния.

Тензорезисторы с помощью припаянных к ним выводных проводов 5, соединены со сборными пластинками 2, закрепленными на кольце из диэлектрика 3.

Давление в манометре измеряется схемой неуравновешанного моста, плечами которого являются тензорезисторы $R_1...R_4$.

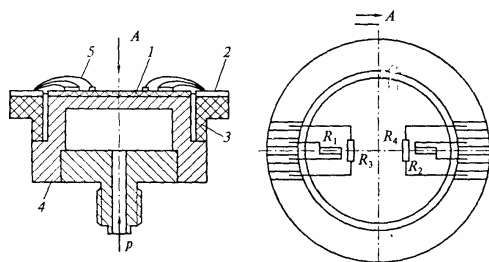


Рис. 6.9. Конструкция тензометрического манометра:
1 – сапфировая пластина; 2 – сборные пластинки; 3 – кольцо из диэлектрика; 4 – корпус; 5 – выводные провода

В результате деформации мембраны с сапфировой пластинкой 1 и тензорезисторами возникает разбаланс моста в виде напряжения, которое с помощью усилителя преобразуется в выходной сигнал, пропорциональный измеряемому давлению.

Принцип действия *тепловых вакуумметров* (рис. 6.10) основан на зависимости теплопроводности газовой среды от степени ее разрежения. В обеих схемах чувствительным элементом является нагретая путем пропускания электрического тока платиновая нить 3, расположенная в вакуумном баллоне 2. При увеличении разрежения среды ее теплопроводность будет уменьшаться, следовательно, нагретая платиновая нить будет хуже отдавать тепло стенкам вакуумного баллона 2, в результате чего ее температура будет возрастать. Измеряя температуру нити, можно судить о наличии вакуума. Температура нагрева нити должна быть около $+ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для исключения теплопередачи за счет лучеиспускания.

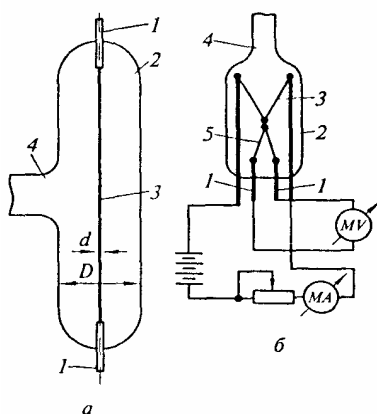


Рис. 6.10. Тепловые вакуумметры:

а – сопротивления; *б* – термопарный; 1 – электрические вводы;
2 – вакуумный баллон; 3 – платиновая нить; 4 – соединительная трубка;
5 – термопара

В термопарном тепловом вакуумметре температуру измеряют термопарой 5, изготовленной из хромель-копели, и соединенной с нитью при помощи крючка из тонкой проволоки. Температура нити измеряется милливольтметром, подключаемым через электрические вводы 1. Тепловые вакуумметры применяются для измерения очень малых величин давления (вакуума).

7. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

7.1. Измерение количества и расхода жидкостей и газов

При измерении расхода и количества вещества приходится иметь дело с движущейся жидкостью. Жидкостями в гидравлике считают физические тела, находящиеся как в жидком, так и в газообразном состоянии и легко изменяющие свою форму под действием сил самой незначительной величины.

Основными характеристиками движущейся жидкости являются: гидродинамическое давление p , скорость движения движущихся частиц W и плотность жидкости ρ . Поскольку расход связан с движением жидкости, то и методы измерения расхода, очевидно, будут зависеть от измерения основных характеристик движущейся жидкости.

Средства измерения, определяющие количество вещества, протекающего через поперечное сечение трубопровода в единицу времени, называются *расходомерами*.

Помимо деления всех устройств для измерения объема и массы, представленных счетчиками и расходомерами, существует классификация их методов измерения по тем физическим законам, которые лежат в основе принципа действия этих устройств.

Существуют следующие методы измерения:

- объемный;
- переменного и постоянного перепада давления (дросселирующие устройства и расходомеры обтекания);
- скоростного напора (напорные трубки);
- переменного уровня (щелевые расходомеры);
- тепловой, ультразвуковой, электромагнитный, тахометрический, инерциальный, оптический, маркерный и др.

Расходом вещества называется отношение приращения количества вещества (dV или dG), протекающего в данный момент времени t , к приращению времени dt при условии, что t стремится к нулю, следовательно, объемный расход

$$Q_v = \frac{dV}{dt}, \quad (7.1)$$

а весовой расход

$$Q_G = \frac{dG}{dt}. \quad (7.2)$$

Объем вещества, протекающего по трубопроводу,

$$V = FL,$$

где F – площадь поперечного сечения трубопровода;

L – длина участка трубопровода.

При постоянной площади поперечного сечения F можно записать

$$Q_v = \frac{dL}{dt} F,$$

но $\frac{dL}{dt}$ является средней скоростью потока в данном сечении,

следовательно,

$$Q_v = WF. \quad (7.3)$$

Объемный расход вещества – жидкости, газа – определяется в $\text{м}^3/\text{сек}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, а весовой расход – в $\text{кг}/\text{сек}$, $\text{кг}/\text{ч}$, $\text{т}/\text{ч}$.

Если расход характеризует скорость потока, мгновенное значение его, то количество вещества представляет собой интегральное значение вещества, прошедшего через данное сечение трубопровода за некоторый промежуток времени.

$$V = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dV}{dt}, \quad (7.4)$$

$$G = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dG}{dt}, \quad (7.5)$$

где V – объемное количество вещества;

G – массовое количество вещества;

t_1 и t_2 – время, за которое определяется количество вещества.

Количество вещества измеряется в м^3 и кг .

Приборы для измерения расхода называются *расходомерами*, для измерения количества – *счетчиками*.

Расходомеры и счетчики всех типов по принципу действия можно разделить на объемные, скоростные, постоянного и переменного перепадов давления. К скоростным расходомерам можно также отнести индукционные, ультразвуковые и радиоактивные.

На рисунке 7.1 [16] приведена классификация методов и средств измерения расхода и количества жидкостей и газов.

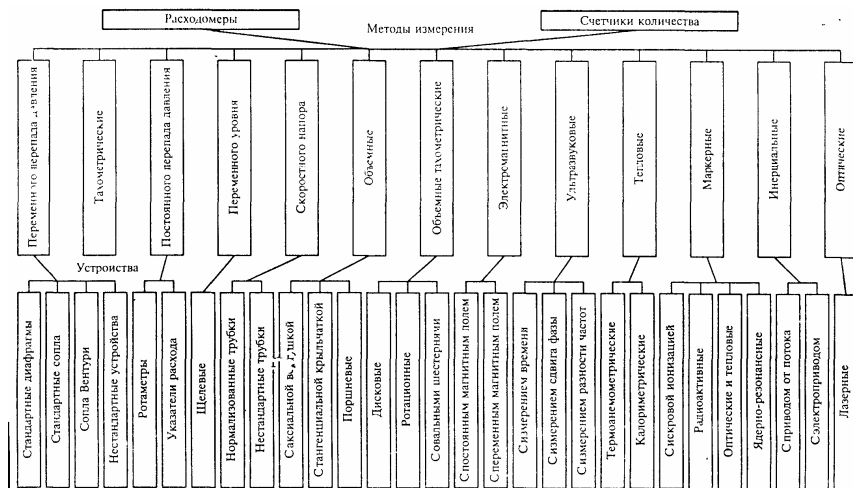


Рис. 7.1. Классификация методов и средств измерения расхода и количества вещества

7.2. Объемные счетчики

Принцип действия объемных расходомеров основан на периодическом или непрерывном отсчете порций измеряемого вещества прибором, имеющим измерительную камеру определенного объема.

Объемный метод относится к числу наиболее точных, т. к. в этом случае измеряется количество вещества, заполняющего данный объем.

Расход за любой промежуток времени при объемном методе измерения является суммой измеряемых объемов, отнесенной к определенному периоду времени. Прибор отделяет непосредственно лишь определенный физический объем и фиксирует число прошедших через измерительную камеру объемов.

Итак, расход, измеренный объемным расходомером, равен сумме измеренных объемов, отнесенной к времени измерения:

$$Q = \frac{nq}{t_2 - t_1}, \quad (7.6)$$

где q – объем измерительной камеры прибора; n – число измеренных объемов;

$t_2 - t_1$ – промежуток времени, в течение которого производились измерения.

Простейшим объемным прибором для измерения количества является мерный бак или мерник. Мерник представляет собой сосуд любого поперечного сечения, имеющий устройство для измерения уровня вещества (мерную линейку, водомерную трубку со шкалой, поплавковое устройство и т. п.). Точность измерения количества жидкости мерником при прочих равных условиях зависит от цены деления шкалы и отношения мерника к его диаметру. Чем это отношение больше, тем точнее измерения, т. к. с увеличением отношения $\frac{H}{D}$ уменьшается це-

на деления шкалы, а, следовательно, погрешность в отсчете будет иметь меньшее абсолютное значение. Наиболее удобным отношением $\frac{H}{D}$ следует считать 1 : 2,5 и 1 : 3.

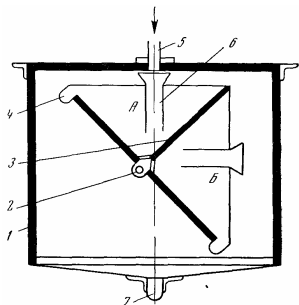


Рис. 7.2. Ковшовый объемный расходомер

На рис.7.2 изображен ковшовый объемный расходомер Мерный бак 3, состоящий из двух сосудов А и В, укреплен и может свободно вращаться на оси 2. Когда сосуд наполнится и жидкость начнет переливаться в желоб 4, центр тяжести сосуда переместится влево от центра вращения, равновесие нарушится и сосуд А опрокинется; сосуд В встанет под трубопровод 5 и будет наполняться. Жидкость, выливающаяся из сосуда в бак 1, будет сливаться по трубке 7. Качания мерного бака передаются на счетчик, который показывает число наполненных сосудов А и В, а, следовательно, и количество измеряемой жидкости.

На рис. 7.3 изображена схема устройства счетчика барабанного типа. Барабан 1, разделенный перегородками 2 на несколько отсеков, может вращаться вокруг полой оси 4, через которую внутрь барабана поступает измеряемая жидкость. Внутренняя полость 3, куда поступает жидкость, соединена щелями b_1 , b_2 , b_3 с отсеками I, II, III, а, следо-

вательно – щелями, l_1, l_2, l_3 с пространством наружного кожуха. По заполнении отсека I жидкость переливается в кольцевую щель l_1 .

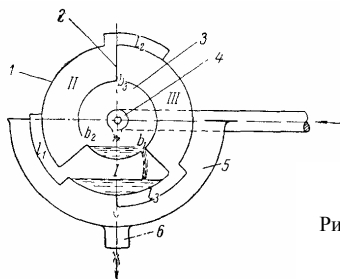


Рис. 7.3. Объемный расходомер барабанного типа

При этом центр тяжести, проходящий через ось вращения барабана, в процессе наполнения отсека начнет перемещаться влево, вызывая вращение барабана против часовой стрелки. При повороте барабана отверстие b_1 выходит из-под уровня жидкости и поступление ее в отсек I прекращается. Одновременно отверстие b_2 перемещается под уровень жидкости, которая и поступает в отсек II , увеличивая вращающий момент. Жидкость из отсека I поступает в кожух 5 , откуда удаляется по трубке 6 . В результате отсек II переходит в крайнее положение на место отсека I , и процесс продолжается непрерывно. Вращение барабана передается расположенному снаружи кожуха счетчику, который отмечает количество прошедшей через прибор измеряемой жидкости.

7.3. Скоростные счетчики

Скоростные, как и объемные, счетчики применяют для определения объемного количества измеряемой среды. Однако в отличие от объемных скоростные счетчики не имеют измерительных камер и производят косвенное измерение количества веществ в объемных единицах.

Чувствительным элементом скоростных счетчиков является аксиальная или тангенциальная турбинка, приводимая во вращение потоком жидкости, протекающим через счетчик.

Принцип действия скоростных счетчиков основан на том, что число оборотов турбинки в единицу времени n пропорционально скорости потока, омывающего турбинку:

$$n = kW, \quad (7.7)$$

где k – коэффициент пропорциональности; W – скорость потока в некотором сечении счетчика F .

Объемный расход через счетчик равен

$$Q = WF \cdot \quad (7.8)$$

Решая совместно (7.8) и (7.7), получим

$$n = \frac{k}{F} Q \cdot \quad (7.9)$$

Отсюда следует, что шкала тахометра, измеряющего мгновенное число оборотов турбинки n , может быть проградуирована в единицах объемного расхода измеряемого потока жидкости.

Таким образом, измеряя суммарное число оборотов турбинки с помощью счетного механизма оборотов, можно получать информацию об объемном количестве вещества. Если же скоростной счетчик снабжен тахометром, то он может измерять объемный расход потока.

При использовании скоростного счетчика в качестве измерителя объемного расхода вещества обычно применяют электрический тахогенератор. Ротор этого генератора получает вращение от оси турбинки скоростного счетчика, а индуцированная в статоре ЭДС измеряется вторичным прибором – вольтметром. Схема скоростного счетчика с аксиальной турбинкой показана на рис. 7.4. Внутри корпуса размещена горизонтально вдоль направления измеряемого потока жидкости турбинка 6, выполненная в виде многозаходного винта. Перед турбинкой установлен струевыпрямитель 1, предназначенный для сглаживания возмущений потока на входе и исключения завихрения. Вращение турбинки через червячную пару 5 и передаточный механизм 2, расположенный в камере 4, передается через сальник 3 счетному устройству.

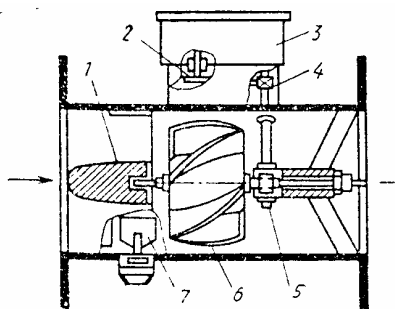


Рис. 7.4. Схема скоростного счетчика с аксиальной турбинкой

Для регулирования скорости вращения турбинки в процессе тарировки счетчика предусмотрено регулировочное устройство 7, ко-

торое позволяет поворачивать одну из радиальных перегородок струе-выпрямителя относительно направления потока.

Счетчики с аксиальной турбинкой изготавливают с диаметрами условного прохода 50–300 мм для измерения количества вещества при расходах 3–1300 м³/ч, классы точности – 1; 1,5; 2.

Для измерения количества жидкости при малых расходах используются скоростные счетчики с тангенциальными турбинками. В этих счетчиках турбинка с прямолинейными или криволинейными лопастями установлена на вертикальной оси. Поток жидкости тангенциально подводится к турбинке и приводит ее во вращение. В зависимости от способа подвода жидкости к лопастям турбинки различают одноструйные и многоструйные счетчики. Жидкость в одноструйных счетчиках (рис. 7.5, а) подводится к прямому гладкому каналу на лопасти турбинки 1 одной струей через фильтр 2.

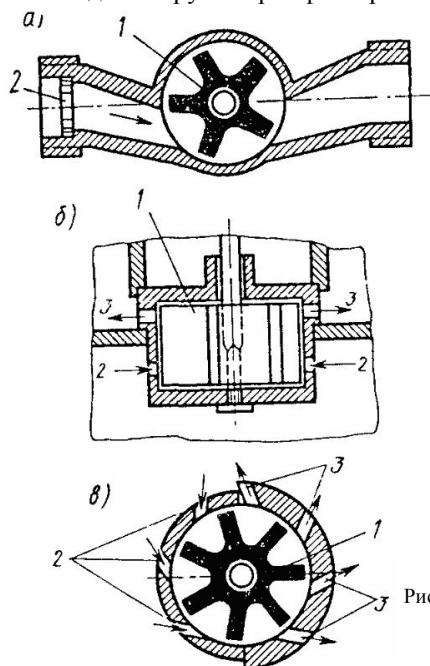


Рис. 7.5. Схема скоростных счетчиков с тангенциальной турбинкой

В многоструйных счетчиках (рис. 7.5, б) корпус выполнен так, что в нем имеются два ряда равномерно распределенных по окружности сопел. Расположение сопел в корпусе счетчика показано на рис. 7.5, в. Через нижний ряд сопел 2 жидкость подается на турбинку А, а через

верхний ряд сопел 3 отводится из камеры вращения турбинки. Одно-струнные счетчики более просты по конструкции и в них меньше потеря давления, но они имеют меньшую надежность из-за одностороннего износа опоры турбинки.

Счетчики с тангенциальной турбинкой имеют диаметр условного прохода 15–40 мм, верхний предел измерений по расходу – 3–20 м³/ч и классы точности – 2–3.

Существенным недостатком скоростных счетчиков является зависимость показаний от вязкости измеряемой жидкости.

7.4. Дроссельные расходомеры

Метод измерения расхода по переменному перепаду давления является наиболее универсальным, т. к. позволяет измерять расход жидкостей газов и пара, протекающих в трубопроводах практически при любых давлениях и температурах.

Как было отмечено ранее, измерение расхода связано с движением измеряемого вещества. Вследствие этого неизбежна взаимосвязь между массой вещества и ее энергетическим состоянием, характеризуемым переходом энергии покоя (запаса энергии), т. е. статического давления, в энергию движения – кинетическую энергию. Эта связь выражается в изменении статического давления, необходимого для придания потока дополнительной скорости при преодолении сопротивления на пути потоку.

Для измерения расхода в трубопроводе на пути потока устанавливают сужающее устройство (дроссельный орган).

Поток жидкости, протекающей через сужающее устройство, имеет вид, представленный на рис. 7.6, а.

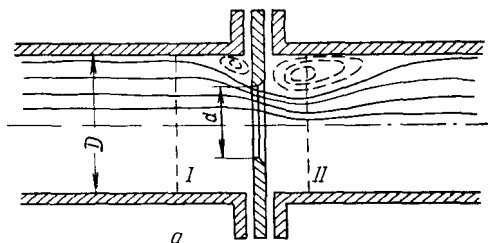


Рис. 7.6, а. Характер потока при установке в трубопроводе сужающего устройства

Струя жидкости, протекающей по трубопроводу, сжимается, достигая наименьшего сечения на некотором расстоянии после диафрагмы. Дальше струя постепенно расширяется до полного сечения трубопровода.

Разность давления ΔP до и после сужения называется *перепадом давления*. Изменение давления при протекании потока через сужающее устройство является следствием изменения потенциальной и кинетической энергии потока. Величина перепада давления поэтому является мерой средней скорости его, а, следовательно, и мерой расхода. Таким образом, измеряя перепад давления дифференциальным манометром (дифманометром) и зная определенную зависимость между перепадом давления и расходом, можно измерять расход.

В реальных потоках положение плоскостей *I* и *II*, соответствующих наибольшему перепаду давления, зависит от температуры, вязкости жидкости и ряда других факторов, поэтому практически давление измеряют непосредственно у плоскостей сужающего устройства.

Объемный расход несжимаемой жидкости Q , как известно, равен произведению площади на скорость потока в этом сечении, следовательно,

$$Q = \mu F_o w_{II} = \frac{\xi \mu F_o}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_I - p_{II})}. \quad (7.10)$$

Коэффициенты ξ и μ зависят от одних и тех же причин: вязкости, трения и формы дроссельного органа. Кроме того, они влияют на изменение коэффициента сужения. Поэтому оба эти коэффициента и коэффициент сужения объединяют одним коэффициентом, который называется *коэффициентом расхода* α :

$$\alpha = \frac{\xi \mu}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}}. \quad (7.11)$$

Коэффициент расхода определяется опытным путем. С учетом (7.21) объемный расход

$$Q = \alpha F_o \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_I - p_{II})}. \quad (7.12)$$

8. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

8.1. Назначение и классификация приборов

Уровнем называют высоту заполнения технологического аппарата рабочей средой – жидкостью или сыпучим телом. Уровень рабочей среды является технологическим параметром, информация о котором необходима для контроля режима работы технологического аппарата, а в ряде случаев для управления производственным процессом.

Путем измерения уровня можно получать информацию о массе жидкости в резервуарах. Подобная информация широко используется для проведения товароучетных операций и управления производственным процессом. Уровень измеряют в единицах длины. Средства измерений уровня называют *уровнемерами*.

Различают уровнемеры, предназначенные для измерения уровня рабочей среды; измерений массы жидкости в технологическом аппарате; сигнализации предельных значений уровня рабочей среды – сигнализаторы уровня.

По диапазону измерения различают уровнемеры широкого и узкого диапазонов. Уровнемеры широкого диапазона (с пределами измерений 0,5–20 м) предназначены для проведения товароучетных операций, а уровнемеры узкого диапазона (пределы измерений $(0 \div \pm 100)$ мм или $(0 \div \pm 450)$ мм) обычно используются в системах автоматического регулирования.

В настоящее время измерение уровня во многих отраслях промышленности осуществляют различными по принципу действия уровнемерами, из которых распространение получили поплавковые, буйковые, гидростатические, электрические, ультразвуковые и радиоизотопные. Применяются и визуальные средства измерения.

Для измерения уровня предложено большое количество приборов, различающихся по принципу действия и конструктивному исполнению. Чтобы знать и уметь выбрать приборы для практических целей измерения, целесообразно их классифицировать по следующим признакам.

По назначению приборы можно разделить на три большие группы: 1) сигнализаторы, контролирующие предельные значения уровня; 2) уровнемеры, непрерывно измеряющие значение уровня, и 3) измерители раздела двух сред.

По способу действия приборы делятся на: 1) дискретного действия, измеряющие число участков, на которое изменился уровень. Длина каждого участка определяется формулой

$$l = m\delta, \quad (8.1)$$

где l – длина каждого участка; m – коэффициент; δ – допустимая погрешность.

Значение уровня, измеряемого прибором дискретного действия, равно

$$H = nl, \quad (8.2)$$

где n – число участков, отсчитываемое прибором;

2) непрерывного действия, показывающие значения непрерывно меняющегося или статического состояния уровня в каждый данный момент.

По принципу действия приборы можно разделить на механические, пьезометрические и электрические. Принцип действия приборов в значительной степени определяется свойствами измеряемой среды, поэтому приборы в указанных группах, в свою очередь, подразделяются по устройству.

Механические:

- поплавковые, с чувствительным элементом, находящимся на поверхности измеряемой жидкости и передающим значение уровня указателю с помощью мерной ленты или троса;

- буйковые (поплавки с отрицательной плавучестью), имеющие в качестве чувствительного элемента буюк, связанный с компенсационным устройством, реагирующим на изменение веса буйка при изменении уровня погружения его в жидкость.

Пьезометрические:

- барботажные, представляющие собой пневматическую трубку, имеющую выход для воздуха на фиксированном положении от дна резервуара. Уровень определяется по давлению воздуха, прокачиваемого по трубке;

- манометрические, определяющие уровень по давлению пьезометрического столба жидкости, воспринимаемого манометром.

Электрические:

- электроконтактные, основанные на изменении электропроводности измеряемых сред. Применяются в основном для контроля раздела сред; емкостные, использующие различие диэлектрических свойств воздуха и намеряемой жидкости;

- радиоактивные, использующие поглощение измеряемой жидкостью γ -лучей, излучаемых радиоактивным излучателем;

- радиоинтерференционные, использующие изменения частоты радиоволн в зависимости от глубины погружения антенны колебательного контура в измеряемую жидкость;

- ультразвуковые, измеряющие уровень по времени распространения ультразвуковых волн в измеряемой среде;
- эндовибраторные, основанные на изменении в зависимости от уровня жидкости резонансных частот резервуара, используемого как полый резонатор для электромагнитных волн.

По способу передачи показаний уровнемеры бывают с местным отсчетом и дистанционного действия.

8.2. Поплавковые уровнемеры

Поплавковые уровнемеры характеризуются простотой конструкции, достаточно высокой точностью, надежностью и сравнительно низкой стоимостью.

Принципиальная схема поплавкового уровнемера показана на рис. 8.1. Изменение уровня жидкости в резервуаре 1 прослеживается поплавком 2 и с помощью гибкой связи 3, перекинутой через ролики 4, передается указателю, показывающему по рейке 5 значение измерительного уровня. Вес гибкой связи уравновешивается контргрузом 6.

При неизменном уровне измерительная система находится в равновесии и

$$M_{\partial} = M_{тр}, \quad (8.3)$$

Движущийся момент равен

$$M_{\partial} = \Delta P r, \quad (8.4)$$

где ΔP – приращение силы P , выталкивающей по плавков из жидкости при изменении уровня; r – радиус ролика 4; $M_{тр}$ – момент трения в осях роликов.

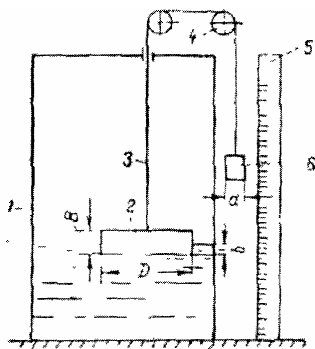


Рис. 8.1. Принципиальная схема поплавкового уровнемера

Зная величины M и r , получаем

$$\Delta P = \frac{M_{\text{тр}}}{p}. \quad (8.5)$$

Приращению силы P соответствует изменение глубины Δb погружения поплавка 2

$$\Delta b = \frac{4\Delta P}{\pi D^2 \rho_{\text{жс}} g}, \quad (8.6)$$

где D – диаметр поплавка; $\rho_{\text{жс}}$ – плотность жидкости.

Чувствительность поплавка тем выше, чем меньше Δb . Уравнение (8.6) показывает, что повышение чувствительности может быть достигнуто уменьшением ΔP . В то же время уменьшение ΔP может быть достигнуто увеличением, а также увеличением r или D . Увеличение диаметра поплавка более эффективно, т. к. D входит в формулу (8.6) в квадрате.

В состоянии равновесия для каждой высоты уровня имеем

$$G_n - P = G_r, \quad (8.7)$$

где G_n – сила тяжести поплавка; P сила, выталкивающая поплавок из жидкости; G_r – сила тяжести противовеса.

8.3. Буйковые средства измерения уровня

В основу работы буйковых уровнемеров положено физическое явление, описываемое законом Архимеда. Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрический буюк, изготовленный из материала с плотностью, большей плотности жидкости. Буюк находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. При изменении уровня жидкости в аппарате масса буйка в жидкости изменяется пропорционально изменению уровня. Преобразование веса буйка в сигнал измерительной информации осуществляется с помощью унифицированных преобразователей «сила - давление» и «сила - ток». В соответствии с видом используемого преобразователя силы различают пневматические и электрические буйковые уровнемеры.

Схема буйкового пневматического уровнемера приведена на рис. 8.2, а. Уровеньмер работает следующим образом. Когда уровень жидкости в аппарате равен начальному h_0 (в частном случае h_0 может быть равен 0), измерительный рычаг 2 находится в равновесии, так как момент M_1 создаваемый весом буйка G , уравновешивается моментом M_2 , создаваемым противовесом N .

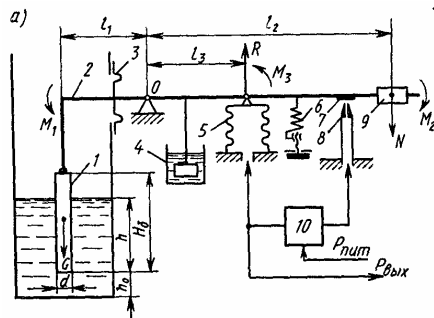


Рис. 8.2. Схемы буйковых пневматических уровнемеров

Когда уровень жидкости становится больше h_0 , часть буйка погружается в жидкость. Поэтому вес буйка уменьшается, а, следовательно, уменьшается и момент M_u , создаваемый буйком на рычаге 2. Так как M_2 становится больше M_u , рычаг 2 поворачивается вокруг точки O по часовой стрелке и прикрывает заслонкой 7 сопла 8. Поэтому давление в линии сопла увеличивается. Это давление поступает в пневматический усилитель 10, выходной сигнал которого является выходным сигналом уровнемера. Этот же сигнал одновременно посылается в сильфон отрицательной обратной связи 5. При действии давления $P_{\text{вых}}$ возникает сила R , момент M_3 которой совпадает по направлению с моментом M_u , т. е. действие силы R направлено на восстановление равновесия рычага 2. Движение измерительной системы преобразователя происходит до тех пор, пока сумма моментов всех сил, действующих на рычаг 2, не станет равной 0, т. е.

$$M_1 + M_3 - M_2 = 0. \quad (8.8)$$

Представляя моменты M_1, M_2, M_3 в виде произведений соответствующих сил и плеч, получим

$$Gl_1 + Rl_3 = Nl_2, \quad (8.9)$$

где G – вес буйка при погружении его в жидкость на глубину h ; l_1, l_2, l_3 – плечи действующих сил относительно точки O ; R – сила, развиваемая сильфоном; N – вес противовеса.

8.4. Электрические и акустические средства измерения уровня

Ультразвуковые уровнемеры (рис. 8.3) находят применение в технологических процессах, связанных с использованием токсичных и

9. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Системы передачи измерительной информации предназначены для сбора информации с удаленных от наблюдателя объектов. В телемеханике подобные измерительные системы называют телеизмерительными (от греч. *tele* – далеко).

Для контроля и управления технологическими процессами широко используются телеизмерительные системы ближнего действия, называемые *системами дистанционной передачи*. С помощью этих систем измерительная информация может передаваться на расстояние от нескольких десятков метров до 10–20 км.

Информация по каналам связи в измерительных системах передается в форме сигналов.

Процесс нанесения информации на носитель называют *модуляцией*.

В настоящее время известно более десяти видов модуляций, из которых в системах передачи информации, применяемых на предприятиях, использующих химико-технологические процессы, получили распространение прямая модуляция физических величин (рис.9.1 а) и частотная модуляция гармонических колебаний (рис.9.1, б).

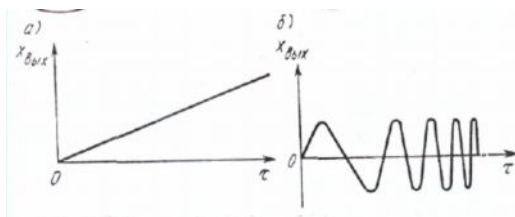


Рис. 9.1. Виды модуляций

В государственной системной приборов (ГСП) приняты следующие системы передачи: пневматическая, электрическая токовая и электрическая частотная.

Ранее было акцентировано внимание на эффективности блочно-модульного принципа построения средств измерений. Указанный принцип широко применяется при создании первичных измерительных преобразователей (ПИП) систем передачи информации ГСП.

Возможность построения ПИП блочно-модульного типа объясняется тем, что большое число технологических параметров, таких как давление, перепад давления (расход), плотность, вязкость, температура, уровень, скорость вращения и другие, легко и с достаточной

для практики точностью преобразуются в усилие или линейное (угловое) перемещение. В ПИП блочно-модульного типа преобразование технологического параметра в унифицированный сигнал осуществляется по схемам: а) технологический параметр – усилие – унифицированный сигнал; б) технологический параметр – перемещение – унифицированный сигнал. Преобразование усилия в унифицированный пневматический или электрический сигналы осуществляется преобразователями, работа которых основана на принципе компенсации сил. Широкое распространение получили преобразователи, с помощью которых сила преобразуется в пневматический сигнал-преобразователи «сила – давление», а также преобразователи «сила – ток», посредством которых сила преобразуется в унифицированный сигнал постоянного тока (токовый сигнал). Указанные преобразователи иногда соответственно называют «пневмосиловые» и «электросиловые».

Преобразование перемещения в унифицированный электрический сигнал постоянного тока осуществляется преобразователями «перемещение – ток», называемыми *магнитомодуляционными* (преобразователи с компенсацией магнитных потоков).

Преобразователи «сила – давление», «сила – ток» и «перемещение – ток» представляют собой модули, использование которых обеспечивает взаимозаменяемость ПИП в целом и отдельных его узлов. Конструктивно ПИП в ГСП оформляется в виде блока, включающего чувствительный элемент, к которому непосредственно подводится измеряемый технологический параметр P , и один из названных преобразователей.

9.1. Пневматические системы передачи измерительной информации

Системы передачи измерительной информации с унифицированным пневматическим сигналом находят применение в тех отраслях промышленности, где по условиям техники безопасности нецелесообразно использование электрических систем передачи. Пневматическая система передачи обеспечивает надежную передачу информации на расстояние до 300 м, а при использовании специального усилителя мощности – до 600 м. При больших расстояниях между объектом и пунктом приема информации точность системы передачи информации уменьшается.

Передача информации в пневматических системах осуществляется по каналу связи, представляющему собой пластмассовую или металлическую трубку внутренним диаметром 4–10 мм.

На рис. 9.2 представлена схема пневматической системы передачи. Система включает ПИП *I* (источник информации) и приемник информации *IV*, соединенные между собой каналом связи. ПИП *I* устанавливается непосредственно на объекте и осуществляет преобразование измеряемого параметра *Я* в унифицированный пневматический сигнал $P_{\text{вых}}$.

Основными узлами ПИП являются чувствительный элемент *II* и преобразователь «сила – давление» *III*. В качестве чувствительного элемента может быть использован любой чувствительный элемент, осуществляющий преобразование технологического параметра *П* в усилие. Например, при измерении давления чувствительным элементом может служить трубчатая пружина, сильфон или мембрана, а при измерении уровня жидкости – буюк и т. п.

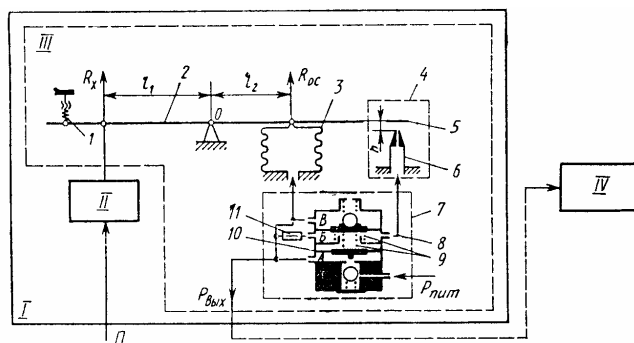


Рис. 9.2. Схема пневматической системы передачи измерительной информации

Преобразователь «сила – давление» (см. рис. 9.2) состоит из корректора нуля – пружины 1, рычага 2, сильфона обратной связи 3, управляемого пневмосопротивления типа «сопло – заслонка» 4 и пневматического усилителя мощности 7. Управляемое пневмосопротивление 4 является индикатором перемещения рычага 2. Питание сопла производится через усилитель мощности 7 из линии выходного сигнала через постоянное пневмосопротивление 11. Поэтому давление в камере *Б* всегда меньше, чем в камерах *А* и *В*, на одно и то же значение, определяемое натяжением пружин 9. Преобразование технологического параметра *П* в пневматический сигнал осуществляется следующим образом. При отклонении преобразуемого параметра *П* от исходного значения изменяется сила R_x , что приводит к перемещению рычага 2

относительно точки опоры O . Одновременно с рычагом перемещается и укрепленная на нем заслонка 5 относительно сопла 6. Это приводит к изменению зазора h между соплом и заслонкой. В результате зазор становится равным h_1 , и рычаг 2 занимает положение A . Этому положению заслонки соответствует давление на выходе сопла, которое после усиления в усилителе мощности подается в сильфон отрицательной обратной связи 3 и в канал связи. Под действием возросшего давления $P_{\text{вых}}$ сильфон 3 начинает деформироваться и отодвигать заслонку от сопла. Изменение $P_{\text{вых}}$ происходит до тех пор, пока не наступит равновесие системы.

9.2. Электрические системы передачи измерительной информации

Одной из распространенных систем передачи измерительной информации является электрическая система с унифицированным токовым сигналом. Использование постоянного тока в этой системе повышает ее помехоустойчивость, т. к. позволяет исключить влияние индуктивности и емкости линий связи на сигнал измерительной информации и увеличивает протяженность канала связи до 5–20 км.

Приемниками информации в электрических системах передачи могут быть промежуточные преобразователи, регуляторы, измерительные приборы или средства вычислительной техники.

В качестве источников информации в электрических системах передачи с унифицированным токовым сигналом применяются первичные измерительные преобразователи, оснащенные преобразователями либо «сила – ток», либо «перемещение – ток».

9.3. Сельсинная система передачи измерительной информации

Для передачи на расстояние больших угловых перемещений применяют сельсинные системы, в которых преобразование угловых перемещений в сигнал измерительной информации осуществляется сельсинами.

Сельсины представляют собой электрические микромашины переменного тока. Работа сельсинов основана на преобразовании углового перемещения в изменение индуктивной связи между обмотками возбуждения и синхронизации. На рис. 9.3 приведена схема сельсинной системы передачи. Система состоит из ПИП и приемника информации VI . ПИП содержит чувствительный элемент, кинематически связанный с ротором сельсина III , называемого *сельсином-датчиком*.

Приемник информации *VI* представляет собой сельсин, называемый сельсином-приемником, ротор которого кинематически связан с отсчетным устройством *IV*.

Обмотки возбуждения *ОБ1* и *ОБ2* сельсинов подключаются к сети однофазного напряжения, а одноименные обмотки синхронизации *1–3* соединены между собой проводами канала связи. Такая схема соединения сельсинов называется *индикаторной*. При протекании тока по обмотке возбуждения возникает пульсирующий магнитный поток, который индуцирует в каждой фазе обмотки синхронизации переменные ЭДС:

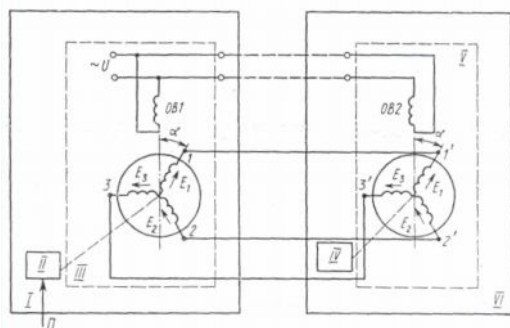


Рис. 9.3. Схема сельсинной системы передачи измерительной информации

$$E_1 = E_{\max} \cos \alpha; \quad (9.1)$$

$$E_2 = E_{\max} \cos(\alpha - 120^\circ); \quad (9.2)$$

$$E_3 = E_{\max} \cos(\alpha + 120^\circ), \quad (9.3)$$

где $E_{\max}$ — наибольшее действующее значение ЭДС фазы обмотки, когда ее ось совпадает с осью магнитного потока возбуждения; α — угол поворота ротора.

Если оси одноименных обмоток синхронизации *1–3* сельсинов расположены одинаково относительно осей обмоток возбуждения, то в фазах обмоток синхронизации сельсинов индуцируются одинаковые ЭДС, уравнивающие друг друга. В результате токи в обмотках и линиях связи равны нулю. Этому состоянию равновесия соответствует согласованное положение сельсинов.

Отклонение измеряемого параметра *Π* от исходного значения преобразуется чувствительным элементом в угловое перемещение ротора сельсина-датчика. Новое положение сельсина-датчика оп-

ределяется углом φ . В этом состоянии равновесие ЭДС обмоток синхронизации нарушается, и между одноименными зажимами обмоток возникают ЭДС, равные разностям ЭДС соответствующих фаз сельсина-датчика и сельсина-приемника. По обмоткам синхронизации проходят токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем обмоток возбуждения, создают в каждом сельсине синхронизирующий момент M , пропорциональный синусу угла рассогласования:

$$M = M_{\max} \sin \varphi, \quad (9.4)$$

где $M_{\max}$ – наибольший синхронизирующий момент при $\varphi = 90^\circ$; $\varphi = \beta - \alpha$ – угол рассогласования.

Так как положение ротора сельсина-датчика фиксировано, то синхронизирующий момент поворачивает ротор сельсина-приемника до согласования с ротором сельсина-датчика. В состоянии равновесия ротор сельсина-приемника останавливается. О значении измеряемого параметра судят по отсчетному устройству *IV*, с которым связан ротор сельсина-приемника.

Абсолютная погрешность сельсинов-датчиков $\pm(0,25; 0,5; 10)$ град, сельсинов-приемников $\pm(0,75; 1,5; 2,5)$ град. Расстояние между сельсином-датчиком и сельсином-приемником до 2–3 км.

9.4. Пневматические и электропневматические преобразователи

В большинстве современных систем автоматического управления производственными процессами используются средства измерений с различными выходными и входными сигналами, например, пневматическими, электрическими, гидравлическими и др. Для обмена информацией в подобных системах широко применяются преобразователи пневматических сигналов в электрические (ПЭП) и электрических сигналов в пневматические (ЭПП).

Пневмоэлектрические преобразователи – измерительные преобразователи, предназначенные для преобразования непрерывного унифицированного пневматического сигнала в непрерывный унифицированный сигнал постоянного тока. Известно большое число различных по принципу действия ПЭП. Наиболее широкое применение в измерительных системах получил ПЭП, работающий по принципу компенсации моментов сил.

Класс точности пневмоэлектрического преобразователя

Электропневматические преобразователи необходимы в тех случаях, когда в пневматическую систему управления требуется ввести информацию

о технологических параметрах, поступающую от измерительных преобразователей с унифицированным токовым сигналом, а также, когда автоматическая система управления электрическая, а ее командный сигнал посылается на пневматический исполнительный механизм. Широкое распространение получили электропневматические преобразователи (ЭПП), работа которых основана на принципе компенсаций усилий.

Системы централизованного контроля

Система централизованного контроля является наиболее удобной информационной системой.

Всю информацию в ходе технологического процесса можно разделить на три группы: *оперативную, статистическую и отчетную.*

Оперативная информация включает в себе сведения, используемые оператором для непосредственного воздействия на управляемый объект. Если выдавать оператору всю информацию, характеризующую технологический объект, то ему будет трудно извлечь из нее данные для управления технологическим процессом. Кроме того, лишняя информация будет отвлекать внимание оператора от необходимой для управления информации.

Объем оперативной информации уже объема информации, характеризующей технологический процесс. Он должен соответствовать минимуму, необходимому для управления последним.

Оперативная информация должна быть представлена оператору в виде, удобном для использования. В некоторых случаях нет необходимости передавать непрерывные сообщения об изменении технологического параметра. Бывает достаточно передавать только отклонения от допустимых значений изменения параметра, т. е. передавать сигнализацию нарушений нормального режима производственной установки.

Значения параметров, соответствующие подаче предупредительной и аварийной сигнализации машинами централизованного контроля, печатаются красным цветом.

Статическая информация включает в себе сведения, используемые для управления технологическим процессом после необходимого их накопления за несколько часов, суток или даже месяцев и последующей обработки – сопоставления, анализа, выявления тенденций изменения.

Для накопления статистической информации машины централизованного контроля должны обладать необходимой памятью. Форма, в которой выводится статистическая информация, зависит от способа ее дальнейшей обработки. Если статистическая информация предназначена для обработки ее вычислительными устройствами, то

для воспроизведения ее применяют перфорированные карты, перфорированные ленты, магнитные ленты.

Для того чтобы статистическую информацию можно было читать и обрабатывать без применения вычислительных машин, ее регистрируют на бумаге. Машины централизованного контроля применяют цифровую регистрацию в виде таблиц и чисел как наиболее удобную.

Существуют следующие виды передачи информации машинами централизованного контроля.

1. *Непрерывная регистрация контролируемых параметров.* В этом случае применяют аналоговые самописцы.

2. *Периодическое измерение контролируемых параметров.* Периодичность контроля параметра должна быть согласована с характером изменения параметра во времени, т. е. зависит от динамических свойств объекта. При удлиненном периоде можно пропустить ценную информацию, а при сокращенном - перегрузить бланк избытком данных, что затрудняет их использование.

3. *Передача информации по вызову.* Этот способ передачи применяется в тех случаях, когда с большого количества точек технологического объекта к оператору должна поступать однотипная информация (например, значение температуры в различных точках), для измерения которой может быть применен один и тот же вторичный измерительный прибор.

10. МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

10.1. Монтаж отборных устройств датчиков и вторичных приборов

Отборные устройства представляют собой конструктивные элементы, монтируемые па технологическом оборудовании и трубопроводах. Они предназначены для установки первичных приборов или же подключения соединительных линий, передающих воздействие контролируемой величины на измерительный прибор.

Правильность выбора места установки и монтажа отборных устройств в значительной мере определяет возможную точность измерений. Нарушение правил монтажа отборных устройств и датчиков может привести к возникновению дополнительных погрешностей, искажающих показания измерительных приборов. Поэтому необходимо тщательно контролировать монтаж отборных устройств, т. к. по окончании работ исправление допущенных ошибок в большинстве случаев сопряжено с большими трудностями.

Наиболее распространенным видом отборных устройств являются бобышки, которые могут быть прямыми или угловыми (рис. 10.1). Они применяются на трубопроводах и аппаратах с металлическими стенками. Угловые бобышки применяются для отборных устройств, устанавливаемых на коленах трубопроводов, а также при необходимости наклонной установки первичного прибора. Бобышки служат для закрепления первичного прибора и ввода его чувствительного элемента в контролируемую среду. Если первичный прибор отнесен от места отбора, то бобышка используется для присоединения импульсного трубопровода (соединительной линии) к запорному вентилю или крану.

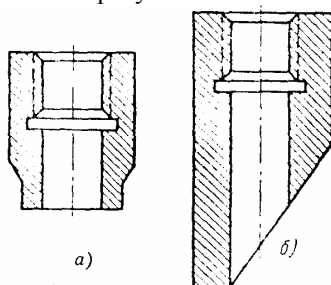


Рис. 10.1. Бобышки:

a – прямая; *б* – скошенная (под углом) 30 или 45 °

В качестве отборных устройств в этом случае применяются бобышки, приваренные к круглым отверстиям металлических корпусов аппаратов, резервуаров или стенках трубопроводов. Отверстие должно иметь ровные края без заусенцев.

На технологических агрегатах, работающих при давлениях, близких к атмосферному, с кирпичными стенами с металлической обшивкой или без обшивки применяют устройства, называемые оправами (рис. 10.2). Они используются еще как средства крепления первичных приборов (термопар, термометров сопротивления и пр.). Оправы могут монтироваться в вертикальном и наклонном положениях. Учитывая, что при высокой температуре первичный прибор, например термопара, может прогибаться под действием собственной тяжести, в закладной трубе оправы в случае горизонтального монтажа предусматривают подставку.

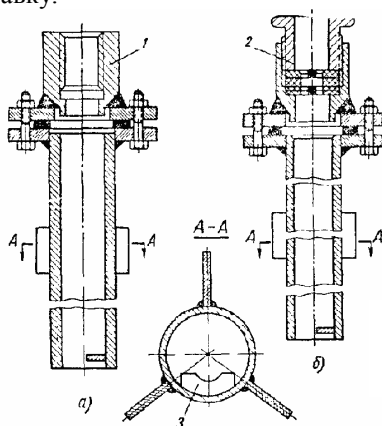


Рис. 10.2. Оправа:
а – с бобышкой; б – с сальником;
1 – бобышка; 2 – сальник;
3 – подставка

Места расположения приборов местных замеров и датчиков должны выбираться с учетом следующих требований:

- обеспечения минимальных внешних воздействий (вибрация, тряска, удары, тепловое воздействие, влажность и т. д.), приводящих к увеличению погрешности приборов или их износу;
- исключения повреждения приборов при ремонте технологического оборудования;
- обеспечения доступности приборов и удобного их обслуживания во время эксплуатации.

В местах установки датчиков должны быть предусмотрены дренажные линии, необходимые для продувки импульсных линий.

В производственных помещениях до начала монтажа датчиков и первичных приборов должны быть закончены все строительные работы, монтаж и изоляция технологического оборудования и трубопроводов.

Отборные устройства, оправы, а также вспомогательное оборудование, которые привариваются к технологическим трубопроводам и аппаратам, монтируются и опрессовываются вместе с ними.

При измерении разрежений и небольших давлений (тяги или напора) требуется строгое соблюдение правил монтажа отборных устройств. Заборные трубки не должны выступать внутрь потока (рис. 10.3, а), т. к. это создает завихрения и вносит дополнительную погрешность в измерение. При отборе давления (разрежения) влажных газов необходимо предусматривать возможность сбора и периодического удаления конденсата (рис. 10.3, б).

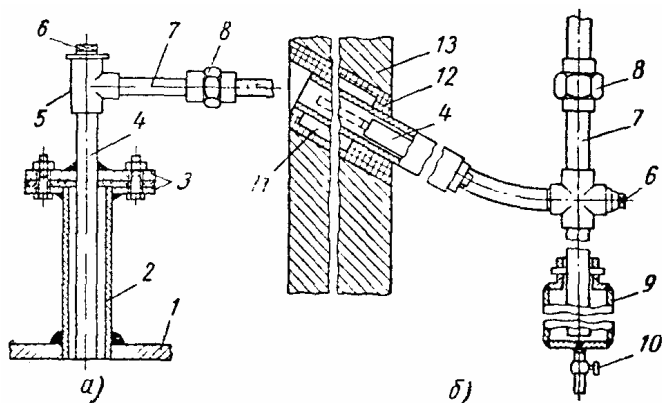


Рис. 10.3. Устройство отбора импульса напора или тяги:

- А – в металлическом трубопроводе; б – в газоходе, топочном пространстве;
 1 – трубопровод; 2 – монтажная труба; 3 – фланцы; 4 – труба отбора импульса;
 5 – тройник; 6 – пробка; 7 – импульсная линия к прибору; 8 – импульсное соединение;
 9 – конденсационный сосуд; 10 – дренажный кран; 11 – ребро жесткости;
 12 – цементный раствор; 13 – кирпичная кладка

Отборное устройство должно располагаться в месте, где поток равномерен и отсутствуют завихрения. Если отборы часто засоряются, необходимо создать условия для чистки или продувки устройства.

Отборы давления для манометров осуществляются через сверления в стенках металлических корпусов аппаратов или трубопроводов с приваренным присоединительным штуцером (рис. 10.4). Отборное устройство снабжается соответствующей запорной арматурой.

Место отбора давления не следует располагать на коленах или тройниках трубопроводов, а также в непосредственной близости от запорной или регулирующей арматуры.

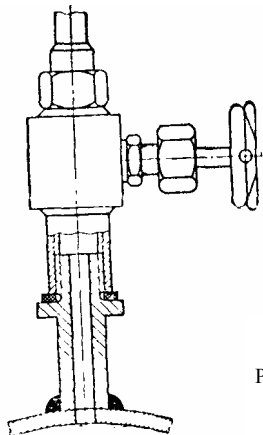


Рис. 10.4. Устройство отбора давления в трубопроводе до $1,6 \text{ Мн/м}^2$

Сужающие устройства должны устанавливаться соосно с трубопроводом, а плоскость торца устройства должна быть перпендикулярна оси трубопровода. Цилиндрическая расточка сужающего устройства должна быть обращена навстречу потоку, а коническая – в сторону выхода потока.

Внутренний диаметр камер сужающих устройств должен быть равен внутреннему диаметру трубопровода. Расхождения, превышающие 1 %, не допускаются. Трубопровод на расстоянии не менее $2D$ (где D – внутренний диаметр трубопровода) от диафрагмы должен иметь строго цилиндрическую форму. Максимальное отклонение диаметра (эллиптичность) трубопровода не должно превышать $\pm 0,3\%$.

Для правильной работы диафрагмы необходимо иметь прямой участок трубопровода с гладкими стенками, чтобы поток до и после диафрагмы был ламинарным, без завихрений. Установка сужающих устройств непосредственно у местных сопротивлений (колена, задвижки, вентили и т. п.) не допускается. Длина прямого участка до сужающего устройства должна быть не менее $10D$, а после него не менее $5D$. Регулирующие задвижки и вентили можно устанавливать перед сужающим устройством на расстоянии не менее $100D$.

Отверстия для отбора статических давлений должны сверлиться так, чтобы расстояние наиболее удаленной точки кромки отверстия от

торца сужающего устройства не превышало 0,03 D. Диаметр отверстий для бескамерных диафрагм должен быть $\leq 0.03 D$, но не менее 4 мм и не более 10 мм.

10.2. Эксплуатация, ремонт и поверка приборов

Обеспечение исправного состояния контрольно-измерительных и регулирующих приборов на предприятии возлагается на персонал, организуемый в специализированную производственную единицу. В зависимости от характера производства и насыщенности предприятия средствами автоматизации такая производственная единица может иметь наименование группы или цеха контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА).

В задачи цеха КИПиА входят:

- текущее обслуживание оборудования КИПиА, установленного в цехах предприятия. Разработка инструкций по эксплуатации КИПиА применительно к условиям работы предприятия;
- периодическая поверка, ремонт, аттестация, а также представление приборов и мер в установленные сроки для государственной поверки;
- контроль правильности эксплуатации и хранения приборов. Изъятие из эксплуатации изношенных, неверных или используемых не по назначению измерительных приборов. Изучение износоустойчивости и разработка мероприятий по увеличению срока службы оборудования КИПиА;
- выявление случаев неправильного отпуска и учета материалов и энергии, связанных с применением неверных измерительных приборов или неправильного пользования ими;
- учет и паспортизация средств автоматизации, имеющих на предприятии;
- разработка небольших проектов по изменению систем КИПиА на предприятии и выполнение монтажных работ; контроль и приемка монтажа КИПиА, выполняемого силами сторонних организаций;
- составление заявок на замену изношенных приборов, на необходимые для ремонта и эксплуатации запасные части, инструмент, принадлежности (ЗИП) и материалы;
- организация технической учебы для всего персонала службы.

Для выполнения перечисленных задач цех КИПиА должен располагать необходимой производственной базой и штатами, определяе-

мыми характером производства и объемом оборудования, обслуживаемого цехом.

Примерная структура цеха КИПиА крупного промышленного предприятия приведена на рис. 10.5.

Нормальная и безотказная работа оборудования КИПиА на предприятии обеспечивается правильной организацией обслуживания и ремонта. В этих целях КИП и А включает все эксплуатируемое им оборудование в систему планово-предупредительного ремонта (ППР). Эта система представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по осмотру, ремонту и поверке приборов, проводимых в соответствии с эксплуатационными инструкциями и графиками в плановом порядке.



Рис. 10.5. Структурная схема цеха КИПиА

Сущность системы ППР заключается в том, что через определенные промежутки времени, обусловленные назначением прибора и условиями его эксплуатации, приборы подвергаются осмотру и поверке, что обеспечивает использование на предприятии только исправной техники. При выявлении неисправности прибор направляется в ремонт.

Необходимость ремонта приборов вызывается главным образом постепенным изменением их характеристик в процессе эксплуатации, что со временем приводит к снижению точности ниже допустимой. Обусловлено это износом и изменением формы трущихся поверхностей, постепенным загрязнением узлов кинематики в местах сочленения. На изменение характеристик влияет также процесс естественного старения, сопровождающийся изменением характеристик.

В зависимости от характера причин, вызвавших неисправность прибора, и объема повреждений различают три вида ремонтов: капитальный, средний и текущий. Первые два вида ремонта требуют сня-

тия приборов, они выполняются в мастерской КИПиА, а последний можно проводить на месте силами эксплуатационного персонала.

Капитальному ремонту подвергаются приборы, имеющие значительный износ деталей, а также серьезные повреждения. Капитальный ремонт должен выполняться в плановом порядке по графикам, составляемым цехом КИПиА, на основе сроков капитального ремонта приборов, установленных для предприятия.

Капитальный ремонт предусматривает полное восстановление работоспособности прибора, он характеризуется его разборкой. При этом все изношенные детали и узлы заменяют. Обычно устанавливают новую шкалу, ремонтируют и красят корпус. После капитального ремонта осуществляют регулировку и опробование прибора в работе на испытательном стенде. По окончании капитального ремонта прибор должен быть подвергнут ведомственной, а при необходимости – государственной проверке.

Среднему ремонту подлежат приборы, имеющие частичный износ деталей, загрязненность, нарушения характеристик механических и электрических элементов и, следовательно, повышенную погрешность. Периодичность этого вида ремонтов может быть различной для однотипных приборов и устанавливается в зависимости от характера и условий эксплуатации.

Средний ремонт характеризуется чисткой прибора без разборки, смазкой трущихся поверхностей, заменой подшипников, подтяжкой соединений и заменой мелких второстепенных деталей. Предусматривается регулировка кинематики, настройка электрических элементов, чистка контактных поверхностей, замена радиоламп, батарей и др. В случае необходимости перестраивается шкала. После среднего ремонта прибор проходит ведомственную или государственную поверку.

Дефекты в приборах не всегда могут быть выявлены в процессе эксплуатации, т. к. постепенное изменение точности показаний и качества работы прибора в большинстве случаев не привлекает внимания персонала. Поэтому необходимо систематически и планомерно проверять технические характеристики приборов. Поверке также должны подвергаться приборы после ремонта.

Совокупность операций, проводимых с целью установления соответствия характеристик проверяемого рабочего прибора ГОСТом или техническим условиям завода-изготовителя, называется поверкой. Поверку приборов и мер выполняют по методикам, установленным в обязательном порядке инструкциями и методическими указаниями комитета стандартов, мер и измерительных приборов.

Государственной поверке подлежат основные (исходные) образцовые меры и измерительные приборы, применяемые для поверки и градуировки мер и измерительных приборов. Государственная поверка осуществляется только органами Комитета. Государственной поверке подлежат также некоторые измерительные приборы, находящиеся в эксплуатации (рабочие приборы), такие как счетчики электрической энергии, водомеры, дифманометры-расходомеры, используемые для хозяйственных расчетов.

Если предприятие имеет в составе службы КИПиА орган ведомственного надзора за измерительными приборами, зарегистрированный в местных органах Комитета, по разрешению последних приборы, используемые для внутреннего учета, могут не предъявляться на государственную поверку.

Ведомственной поверке подлежат рабочие меры и измерительные приборы, находящиеся в эксплуатации в технологических цехах и выпускаемые после ремонта мастерскими службы КИПиА. Ведомственная поверка проводится поверочной лабораторией службы КИПиА при условии, что предприятие зарегистрировано в местных органах Комитета на право проведения поверки мер и приборов. Поверку выполняют сотрудники, аттестованные в местных органах Комитета и получившие разрешения на проведение поверок, – *ведомственные поверители*.

Текущую поверку проходят меры и измерительные приборы, находящиеся в работе с целью систематического надзора за верностью их показаний и исправностью состояний. Текущая поверка проводится в сокращенном по сравнению с ведомственной в объеме, предусматривающем контроль основных характеристик прибора. Поверка проводится в период между сроками государственных и ведомственных поверок по графикам, разрабатываемым, службой КИПиА. Сроки текущей поверки устанавливаются с учетом времени использования мер и измерительных приборов в зависимости от их назначения и ответственности производимых измерений.

Текущую поверку проводит персонал поверочной лаборатории или эксплуатационный персонал КИПиА в соответствии с «Положением о цехе КИП и А».

Работы, выполняемые во время эксплуатации КИПиА, могут быть разбиты на три категории: оперативные работы, текущее обслуживание, текущая поверка и ремонт.

Оперативные работы, выполняются при пуске, останове или изменении режимов работы технологической установки. В эти работы входит подготовка приборов и их включение в работу, изменение режимов работы приборов, отключение приборов, проверка исправности

работы и т. д. К числу оперативных работ относятся также работы, проводимые с целью своевременного выявления возникающих неисправностей оборудования, которые могли бы повлечь за собой полный отказ в работе и предупреждения их развития. Эти работы выполняются обычно эксплуатационным персоналом при обходе участков с обслуживаемым оборудованием путем визуального наблюдения за состоянием оборудования, по характеру шумов движущихся элементов оборудования, проверкой температуры элементов, в которых есть тепловыделение, и т. д.

Во время таких осмотров выявляют и устраняют нарушения уплотнений соединительных трубных линий и арматуры, перерывы записи самопишущих приборов, повреждения приборов, например, поломки стеклянных термометров, выброс рабочей жидкости из жидкостных манометров и тягомеров; проверяют исправность приборов с помощью контрольных и корректирующих устройств.

Для выявления скрытых нарушений и неполадок, проявляющихся внешне в работе регулятора, рекомендуется не реже одного раза в неделю проводить в порядке профилактики текущую проверку.

Текущая проверка регулятора может проводиться следующими способами:

а) наблюдением за работой регулятора после внесения искусственного возмущения в регулируемый процесс (например, небольшим перемещением регулирующего органа с помощью ручного управления);

б) проверкой работы измерительной части (датчика чувствительного элемента) при отключении автоматического регулирования.

Текущее обслуживание включает в себя комплекс профилактических работ, проводимых в целях обеспечения правильного и бесперебойного действия средств автоматизации и продления их срока службы. Эти работы выполняют в плановом порядке и в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей приборов и опытом эксплуатации. В объем текущего обслуживания входят такие работы, как чистка и смазка приборов, заполнение чернилами перьев самопишущих приборов, замена сухих элементов, замена диаграммной бумаги и т. д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современная техника и технология непрерывно совершенствуются и при эксплуатации требуют измерения и контроля большого числа параметров с высокой точностью. Повышение точности измерительных устройств для решения задач автоматизации управления технологическими машинами и процессами необходимо еще потому, что измерительные устройства, а именно датчики, устанавливаются при создании математических моделей объектов управления. Без соответствующей точности этих измерительных устройств невозможна оптимизация объектов управления.

Усилия ученых и инженеров направлены на разработку новых средств измерительной техники и приборов, позволяющих совершенствовать их конструкцию и повышать точность измерения и надежность работы. При этом должно осуществляться использование новых физических явлений элементной базы приборов на основе материалов.

Количественные задачи повышения точности измерительной техники, решаемые в настоящее время, могут быть охарактеризованы классами точности средств измерения: давления, температуры, уровня 0,1–0,2, расхода 0,2–0,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Волосов С.С., Шлейфер М.Л., Рюмкин В.Я. и др.* Активный контроль размеров /Под ред. С.С. Волосова. М: Машиностроение, 1984. 224 с.
2. *Белов А.М.* Приборы для измерения температуры. М.: Недра, 1968.
3. *Бодлер В.А., Алферов А.В.* Измерительные приборы (теория, расчет, проектирование): Учебник для вузов: В 2 т. М.: Изд-во стандартов. 1986. 224 с.
4. *Бурдун Г. Д.* Справочник по международной системе единиц СИ. М.: Изд-во стандартов, 1980.
5. *Весы и дозаторы весовые: Справочник /С.П. Маликов, С.С. Михайловский, Л.Н. Старостина, П.К. Клементьев.* М.: Машиностроение. 1981. 320 с.
6. *Гордов А.Н. и др.* Методы измерения температур в промышленности. М.: Металлургиздат, 1952.
7. *Грибанов Д. Д., Зайцев С. А., Митрофанов А. В.* Основы метрологии: Учебник для вузов. М.: МГТУ «МAM И», 1999. 195 с.
8. ГСИ. Единицы физических величин. ГОСТ 8.417–81.
9. ГСИ. Метрология. Термины и определения. ГОСТ 16263–70.
10. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. ГОСТ 8–207–76.
11. *Зайдель А.Н.* Элементарные оценки ошибок измерения. М.: Наука, 1967.
12. Измерения в промышленности: Справочное изд.: В 3 кн. /Пер. с нем; /Под ред. П. Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990.
13. Измерительные приборы в машиностроении /Л.Г. Иванов, Г.Д. Бурдун, К.С. Волосков и др. М.: Машиностроение, 1964. 524 с.
14. *Исакович Р.Я.* Приборы для измерения давления. М.: Недра, 1968.
15. *Катыс Г. П.* Объемные расходомеры. М.: Энергия, 1965.
16. *Зайцев С.А., Грибанов Д.Д., Толстов А.Н., Меркулов Р.В.* М.: Издательский центр «Академия», 2003.
17. *Марков Н.Н., Ганевский Г.М.* Конструкция, расчет и эксплуатация контрольно-измерительных инструментов и приборов: Учебник для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1993. 416 с.
18. *Павловский А.Н.* Измерение расхода и количества жидкостей, газов и пара. М., Машгиз, 1953.

19. *Таратута Д.Н., Арутюнов Л.А. Цабкевич Э.Р.* Лопастные счетчики. М.: Машиностроение, 1968.

20. Технологические измерения и контрольно-измерительные приборы: Учебник для техникумов /*А.М. Бельский, В.Ф. Бердышев и др.* М.: Металлургия, 1981. 264 с.

21. *Фарзхане Н.Г., Ильясов Л.В., Азим-Заде А.Ю.* Технологические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1989.

22. *Хофман Д.* Техника измерений и обеспечение качества: Справочная книга /Пер. с нем.; /Под ред. *Л.М. Закса, С.С. Кивилиса.* М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИИ	6
1.1. Понятие об измерении	6
1.2. Классификация измерений	9
1.3. Методы измерений	11
1.4. Единицы измерения	13
1.5. Погрешности измерения	16
1.6. Технический контроль	20
2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И КОНТРОЛЯ	23
2.1. Классификация средств измерений	23
2.2. Структурные схемы измерительных устройств	27
2.3. Статические характеристики измерительных устройств	29
2.4. Динамические характеристики измерительных устройств	32
2.5. Погрешности измерительных устройств	33
3. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ МАССОВЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	39
3.1. Весоизмерительные и весодозирующие устройства	39
3.2. Гири общего и специального назначения	42
3.3. Измерение и контроль геометрических величин	46
3.3.1. Измерительные линейки, штангенинструмент и микрометрические инструменты	48
3.3.2. Средства измерения и контроля с оптическим и оптико-механическим преобразованием	54
3.3.3. Средства измерения и контроля с электрическим и электромеханическим преобразованием	57
4. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	61
4.1. Методы и средства измерения и контроля кинематических величин	61
4.2. Методы и средства измерения и контроля динамических величин	69
5. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	78
5.1. Измерение температур	78
5.1.1. Температурные шкалы	79
5.1.2. Классификация средств измерения температуры	81
5.1.3. Термометры расширения, манометрические и сопротивления	82
5.1.4. Пирометры	85

5.2. Измерение и контроль электрических величин.	87
5.2.1. Средства и единицы измерения	87
5.5.2. Методика измерения в электрических цепях	92
6. ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ДАВЛЕНИЯ В РАЗРЕЖЕНИИ	95
6.1. Единицы измерения и классификация приборов	95
6.2. Жидкостные приборы	97
6.3. Поршневые манометры	102
6.4. Пружинные манометры и вакуумметры	103
7. ИЗМЕРЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ	110
7.1. Измерение количества и расхода жидкостей и газов	110
7.2. Объемные счетчики	112
7.3. Скоростные счетчики	114
7.4. Дроссельные расходомеры	117
8. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ	119
8.1. Назначение и классификация приборов	119
8.2. Поплавковые уровнемеры	121
8.3. Буйковые средства измерения уровня	122
8.4. Электрические и акустические средства измерения уровня	123
9. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ	125
9.1. Пневматические системы передачи измерительной информации	126
9.2. Электрические системы передачи измерительной информации	128
9.3. Сельсинная система передачи измерительной информации	128
9.4. Пневматические и электропневматические преобразователи	130
10. МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ КОНТРОЛЬНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ	133
10.1. Монтаж отборных устройств датчиков и вторичных приборов	133
10.2. Эксплуатация, ремонт и поверка приборов	137
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	143
СОДЕРЖАНИЕ	145

Учебное издание

Агапова Наталья Петровна

**КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА
ГОРНЫХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН**

Учебное пособие

Зав. РИО НТИЦ
Редактор
Техн. редактор
Компьютерная правка
и верстка

З.А. Губайдулина
З.А. Губайдулина
Ж.Н. Байменова
А.Н. Оразалиева

Подписано в печать 30.05. 08 г.
Формат 60х84 1/6. Бумага типографская №1.
Усл. п. л. 9,5. Уч.-изд.л. 9,7. Тираж 500 экз.
Заказ №_____. Цена договорная.

Издание Казахского национального технического университета
им. К.И.Сатпаева
Научно-технический издательский центр КазНТУ
Алматы, ул. Ладыгина, 32