

$$f = f_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta}$$

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

О. С. ДМИТРИЕВ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Утверждено Учёным советом университета
в качестве учебного пособия для студентов 2, 3 курсов
направлений подготовки инженерного профиля
всех форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2022

УДК 53.08 (075.8)
ББК В3ся73
Д53

Р е ц е н з е н т ы :

Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина»
В. А. Федоров

Доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Энергообеспечение предприятий и теплотехника» ФГБОУ ВО «ТГТУ»
А. Н. Грибков

Д53 **Дмитриев, О. С.**

Физические основы технических измерений [Электронный ресурс] : учебное пособие / О. С. Дмитриев. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 00,0 Mb ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2532-6

Представлен обобщенный материал по физическим основам технических измерений. Рассмотрены различные физические явления, понятия и принципы, положенные в основу современных способов измерений, построения измерительных преобразователей, приборов и измерительных систем. Даны схемы принципа действия и фотографии конкретных измерительных приборов, позволяющие студентам лучше освоить современные технические средства измерений и способствующие обеспечению продолжения инженерного образования.

Предназначено для студентов 2, 3 курсов направлений подготовки инженерного профиля всех форм обучения.

УДК 53.08 (075.8)
ББК В3ся73

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

ISBN 978-5-8265-2532-6

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие написано на основе курса лекций по физическим основам технических измерений, прочитанного автором за последние 10 лет студентам Тамбовского государственного технического университета автотранспортного направления. Сделана попытка разработать предельно краткий односеместровый курс, представляющий собой сжатое изложение основных представлений по физическим основам технических измерений, соответствующее вузовской программе. Пособие написано языком, понятным студентам всех специальностей ТГТУ. Одной из задач пособия является формирование целостного представления об измерительной технике и основным подходам к построению средств измерений в основу которых положены те или иные физические явления. Пособие содержит сведения, необходимые для понимания, с одной стороны, существа рассматриваемых явлений, а с другой – для формирования ясного представления о возникновении и развитии физических идей в их взаимосвязи. Использование физических аналогий и примеров общего и конкретного построения средств измерения позволило упростить изложенный материал. Вместе с тем, автор надеется, что необходимую физическую строгость изложения удалось сохранить. Настоящее пособие по физическим основам технических измерений ввиду его краткости не только не исключает, но и предполагает использование более подробных учебников. В конце книги приведен список рекомендуемой литературы по всем разделам курса. В каждой главе все обозначения строго оговорены и при внимательном чтении не должно быть недоразумений. В конце каждой главы предлагается ответить на вопросы для самостоятельной проверки прочитанного материала, что способствует его закреплению.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для студентов бакалавриата технических вузов. Может быть полезно и преподавателям.

Автор считает своим долгом поблагодарить рецензентов за внимательное прочтение пособия и сделанные замечания, позволившие устранить недочеты и скорректировать изложение лекционного материала.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие науки и техники непосредственным образом связано с прогрессом в области измерений. Совершенствуется элементная база измерительных средств, внедряются новые технические решения. Современные приборы уже немыслимы без микропроцессорных систем обработки и визуализации результатов с развитым программным обеспечением, но неизменными остаются физические основы технических измерений, базирующиеся на известных физических эффектах, явлениях и свойствах.

На начальном этапе развития методов и средств измерений большое внимание уделялось выявлению и изучению физических явлений и их использованию в области измерительной техники. По мере того, как создавался определенный набор методов и средств измерений, накапливалась их номенклатура, внимание к использованию физических явлений начало ослабевать, что привело к разрыву между открытыми и используемыми физическими эффектами, явлениями и свойствами. Поэтому важной задачей является изучение и анализ физических эффектов, явлений и свойств помогающих выявлять закономерности, обеспечивающие возможность использования их в новых принципах измерения конкретных физических величин. Прежде всего, необходимо установление механизма действия эффекта с описанием физической сущности процесса и обоснованием его физической модели и теории, которая, в свою очередь, позволяет создать математическую модель физических явлений положенных в основу методов измерений. При анализе целесообразно оценить влияние неконтролируемых величин: температуры, давления, влажности, электромагнитных полей и т.д., которые могут вносить в физические явления целый ряд дополнительных влияющих факторов и эффектов. Последним этапом является выявление возможных методов измерения, которые могут быть созданы на основе определенных физических явлений.

Проведение такого анализа для каждого физического явления позволяет воспроизвести полную картину эффектов, свойств и возможностей при его применении. Анализ в рамках упомянутой схемы целесообразно проводить в случаях, когда физические эффекты, явления и свойства давно известны и на их основе создан тот или иной метод измерения, или методы измерения на их основе начали создаваться только в последние годы, или физические эффекты, открытые в самое последнее время и методы измерения на их основе пока не разработаны. Поиск нового физического эффекта целесообразно проводить, когда существует необходимость в поиске нового принципа измерения, когда все существующие не могут обеспечить решение поставленной проблемы.

1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ

1.1. Предмет и задачи курса «Физические основы технических измерений». Роль измерений в НТП

Измерительная техника – один из важнейших факторов ускорения научно-технического прогресса практически во всех отраслях народного хозяйства.

При описании явлений, процессов и свойств веществ используются различные физические величины, основанные на тех или иных физических законах. Их число достигает несколько тысяч. К ним относятся: механические, электрические, магнитные, тепловые, оптические, акустические, химические и др. распределенные по пространственной и временной координате. Установление числового значения физической величины осуществляется путем измерений. Наиболее широкое распространение получили электрические методы измерений, так как с их помощью достаточно просто осуществлять преобразование, передачу, обработку, хранение, представление и ввод измерительной информации в ЭВМ. Основу методов измерений составляют средства измерений.

Особенностью развития измерительной техники на современном этапе является улучшение характеристик и функциональных возможностей средств измерений. В последние годы существенно возросла точность и быстродействие измерительных приборов, расширился диапазон измерений, увеличилось количество видов измеряемых величин, повысился уровень автоматизации и компьютеризации приборов. Все это стало возможным благодаря активному использованию в приборах современной элементной базы и новых принципов построения приборов.

Одна из основных задач дальнейшего развития измерительной техники и метрологии является обеспечение необходимой точности и достоверности измерительной информации. Уровень развития измерительной техники является важнейшим показателем прогресса науки и техники. Отсюда следует, что развитие измерительной техники должно соответствовать развитию других отраслей науки и техники, т.к. для каждой из этих отраслей получение точных измерений являются одним из путей их совершенствования.

Задачей курса «Физические основы технических измерений» является освоение студентами теоретических знаний и приобретение практических навыков применения измерительной техники. В результате изучения данного курса студенты должны уметь выбирать методы измерения и приборы для измерения механических, электрических, тепловых и оптических величин, а также приборы для измерения геометрических размеров.

1.2. История возникновения и развитие измерений

В процессе своей жизнедеятельности человек был вынужден оценивать и измерять различные величины. Приходилось оценивать количественно и объяснять своим соплеменникам как далеко находится добыча или подходящее жилище, какие оно имеет размеры, насколько тяжелая ноша и какой она занимает объем. Подобные жизненные трудности побуждали человека придумать различные приспособления для количественной оценки физических величин.

Первыми измерительными приборами были средства для измерения линейных и угловых размеров, измерения объема и веса веществ. Позднее был изобретен компас, секстант, хронометр для морской навигации.

Изобретение всех измерительных приборов – манометров, термометров, уровнемеров, расходомеров и других было обусловлено практическими потребностями человека и развития технологии. Так в XVI веке появился термометр для измерения температуры. Приоритет изобретения в 1593 г. водяного термометра принадлежит Галилео Галилею. Хотя первые попытки измерения температуры предпринимались и ранее. Современный вид термометр приобрел в XVIII веке, после того как Фаренгейт предложил наполнять стеклянные трубки своего термометра сначала спиртом, а позднее ртутью. Это предопределило пределы шкалы Фаренгейта. Позднее были изобретены манометры для измерения давления воды, барометры для измерения давления воздуха. Известен опыт Торричелли, которым он показал наличие атмосферного давления и тем самым изобрёл ртутный барометр. Был изобретен гигрометр для измерения влажности воздуха и многие другие приборы.

Основоположник русской науки М. В. Ломоносов (1711–1765) первым в России начал применять количественные измерения. Им были изобретены следующие приборы:

1. Электроизмерительный прибор, для исследования атмосферного статического электричества.
2. Максимальный электростатический вольтметр.
3. Регистрирующий анеометр, предназначенный для записи скорости и направления ветра, и получения изображения розы ветров, с целью планирования расположения металлургических заводов на местности.
4. Самопишущий компас, для нанесения на карту береговой линии.
5. Капельный вискозиметр.
6. Рефрактометр для измерения состава и концентрации жидкости.
7. Прибор для испытания камней и твердых материалов на истирание, с целью поиска карьера с камнями позволяющими делать мостовые.
9. Усовершенствовал ртутный термометр изменив шкалу, принял за начало шкалы 0°Л – соответствовало 0°С , а конец шкалы, которого 150°Л

равен 100°C . (И. Б. Литинецкий "Ломоносов основоположник отечественного приборостроения" М. 1952г.).

Им изобретены также и другие приборы

В конце XVIII и начале XIX века в связи с открытием электрического тока возникла необходимость в создании прибора для измерения силы тока. Георг Ом экспериментально установил зависимость угла отклонения магнитной стрелки от силы тока в проводнике, под которым она расположена, построил прибор и открыл закон, который нам известен как закон Ома.

Приоритет введения в практику электрических измерений отградуированных и снабженных шкалами приборов принадлежит русскому ученому Б. С. Якоби. Он предлагал ввести общепринятые единицы для измерения тока и сопротивления в международном масштабе, разработал, создал и разослал в научные лаборатории Европы эталон электрического сопротивления.

Большой вклад в развитие измерительной техники внес русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский. Им были разработаны электромагнитные, ферродинамические и индукционные приборы, принципы действия которых, не изменились до сих пор, предложены методы измерения электрических и магнитных величин, создан электрический генератор.

1.3. Основные понятия технических измерений

Измерение – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Единицей измерения физической величины (единицей физической величины) называется физическая величина, принятая по соглашению за основание для количественной оценки величин, однородных с нею в качественном отношении.

Единица физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных физических величин.

Размером единицы называется количество физической величины, содержащейся в единице измерения.

Действительное значение физической величины – значение физической величины, найденное экспериментальное путем и настолько близкое к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи может его заменить.

Единство измерений – такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешность измерений известна с заданной вероятностью.

Размерность – представляет собой выражение, отражающее связь физической величины с основными величинами системы измерения, причем коэффициент пропорциональности в этом выражении должен быть равен единице.

Точность – качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

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

Измерительная информация – это информация о значениях измеряемых физических величин, получаемых с помощью средств измерений.

Мера – это средство измерений, предназначенных для воспроизведения физической величины заданного размера. Меры бывают однозначные и многозначные (позиции R , C , L).

Образцовое средство измерения – представляет собой утвержденный в качестве образцовой меры измерительный прибор, предназначенный для поверки по нему других средств измерений.

Эталон единицы – это средство измерений (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений.

1.4. Система единиц измерения

Измерения электрических и неэлектрических величин выполняют в соответствии с *системой единиц физических величин*, которая является совокупностью основных и производных единиц.

Основная единица физической величины выбирается произвольно при построении системы, производная единица образуется по определяющему эту единицу уравнению из других единиц данной системы.

В России в основу системы единиц физических величин положены единицы *Международной системы* (СИ), охватывающие все виды измерений.

Основные единицы системы СИ: метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина, кандела (свеча) и моль.

Шкала физической величины это упорядоченная совокупность значений физической величины, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений.

Техническое обеспечение измерений в соответствии с принятой системой единиц осуществляется мерами.

Кратные и дольные единицы. Образование их наименований. Десятичные кратные и дольные единицы образуются так:

Множитель	Приставка в названии		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
10^{18}	ЭКСА	Э	E
10^{15}	ПЕТА	П	P
10^{12}	ТЕРА	Т	T
10^9	ГИГА	Г	G
10^6	МЕГА	М	M
10^3	кило	к	k
10^2	гекто	г	h
10^1	дека	да	da
10^{-1}	деци	д	d
10^{-2}	санти	с	c
10^{-3}	милли	м	m
10^{-6}	микро	мк	μ
10^{-9}	нано	н	n
10^{-12}	пико	п	p
10^{-15}	фемто	ф	f
10^{-18}	атто	а	a

1.5. Классификация сигналов измерительной информации. Информация, сообщение, сигнал

Необходимые сведения о параметрах определяющих качество продукции, т.е. о составе и свойствах веществ, материалов и изделий, получают в результате соответствующих измерений. Совокупность этих сведений называют *информацией*, а информация, предназначенная для передачи и дальнейшей переработки, является *сообщением*. Сообщение выражается в определенных результатах измерения физических величин.

Существуют различные виды носителей сообщений, все они называются *сигналами*. Сигналы являются материальными носителями сообщений и представляют собой некоторый физический процесс, параметры которого изменяются по закону сообщения.

Сигналы, как некоторые физические процессы, можно наблюдать с помощью различных приборов и устройств.

Классификация сигналов:

По физической природе носителя информации:

- электрические;

- электромагнитные;
- оптические;
- акустические и др.

По способу задания сигнала:

- детерминированные – регулярные, заданные аналитической функцией;
- случайные – нерегулярные, принимающие произвольные значения в любой момент времени. Для описания таких сигналов используется аппарат теории вероятностей.

В зависимости от функции, описывающей параметры сигнала, выделяют аналоговые, дискретные, квантованные и цифровые сигналы:

- аналоговые – непрерывные, описываемые непрерывной функцией;
- дискретные – взятые в определённые моменты времени;
- квантованные – отнесенные по уровню;
- цифровые – дискретные по времени и квантованные по уровню.

Для преобразования сообщения в сигнал применяют специальные устройства, называемые преобразователями. Они преобразуют исходную физическую величину (механическую, световую, тепловую, химическую и др.) в другую физическую величину, которая более удобна для дальнейшей обработки. Преобразователь – это прибор, преобразующий изменение одной физической величины в изменение другой.

Основным требованием к преобразованию является однозначное соответствие между сообщением и сигналом. Только в этом случае сообщение может быть передано с высокой точностью, без искажений и утечки информации.

1.6. Методы измерения физических величин

Основная задача физического эксперимента – измерение физических величин. Измерением называют операцию, с помощью которой устанавливают, во сколько раз измеряемая величина больше или меньше соответствующей величины, принятой за единицу.

В зависимости от приемов получения результатов различают следующие виды измерений:

1. *Прямые измерения* – позволяют получить искомое значение физической величины непосредственно из опытных данных. Например: измерение длины линейкой, времени секундомером, величины тока амперметром, напряжения вольтметром, сопротивления омметром, и т.д.

2. *Косвенные измерения* – позволяют получать искомое значение физической величины на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, которые подвергаются прямым измерениям в ходе эксперимента. Например: объем вычисляют, измерив геометрические

размеры тела, скорость по времени и пути, сопротивление проводника находить по измерениям величины тока и напряжения и т. д.

3. *Совокупные измерения* – предусматривают получение результата из целого ряда однотипных измерений одной и той же физической величины, но выполняемых в разных условиях.

$$\text{Например: } \alpha \text{ из } R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t) \Rightarrow \alpha = \frac{R_{t_1} - R_{t_2}}{R_0(t_1 - t_2)} \Bigg|_{t=t_1}^{t=t_2}.$$

4. *Совместные измерения* – предусматривают одновременное измерение двух или нескольких разноименных физических величин для нахождения зависимости между ними.

Совокупные и совместные способы измерения применяются в основном в исследовательской практике и сопровождаются решением систем уравнений.

Все измерения выполняются соответствующими методами.

Методы измерения – способ получения результата измерений путем использования принципов и средств измерений (см. рис. 1.1).

Метод непосредственной оценки – при котором значение измеряемой величины определяют по отсчетному устройству прибора прямого действия. Пример: длину – линейкой, силу тока – амперметром, напряжение – вольтметром.

Метод сравнения с мерой – измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой.

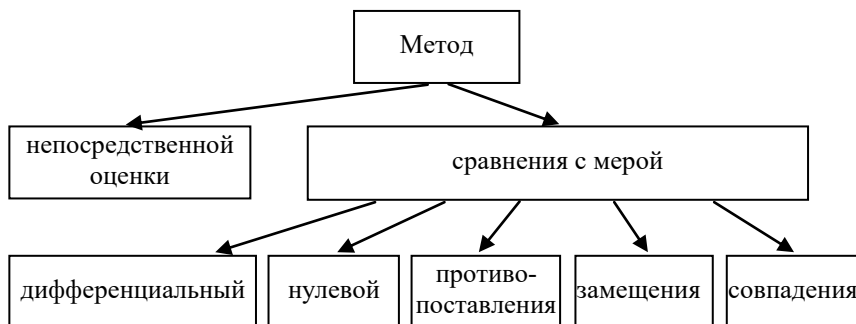


Рис. 1.1. Методы измерений физических величин

Они значительно точнее метода непосредственной оценки. К ним относятся:

Дифференциальный (разностный) метод – при котором на измерительный прибор воздействует разность $\Delta x = x - x_0$ между измеряемой

величиной x и известной величиной x_0 , воспроизводимой мерой. Точность метода возрастает с уменьшением Δx . Пример: взвешивание на весах с частичной компенсацией веса и отсчет разности по шкале весов.

Нулевой метод – частный случай дифференциального метода, при котором результирующую разность Δx , воздействующую на прибор доводят до нуля. Пример: взвешивание на весах при достижении равновесия.

Метод противопоставления – при котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой одновременно воздействует на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между ними. Метод используют при измерении электрических величин.

Метод замещения – при котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой, равной по значению замещенной. Применяют для измерения параметров цепей.

Метод совпадений – при котором разность между измеряемой величиной и известной величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадения отметок шкал или периодических сигналов. Метод применяют при измерении частоты и приеме точных сигналов времени.

Все измерения выполняются в соответствии с методикой.

Методика измерения – детально намеченный порядок процесса измерений, регламентирующий методы, средства, алгоритмы выполнения измерений, которые в определенных условиях обеспечивают измерения с заданной точностью.

1.7. Классификация средств измерений

Измерительный преобразователь – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающийся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительный прибор – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме удобной для восприятия.

Измерительная система – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации, удобной для автоматической обработки, передачи и управления. Если есть

возможность вывода информации оператору, ее накопление, обработка и систематизация, то это информационно-измерительная система (ИИС).

СИ бывают:

- автоматизированное – производящее часть измерительных операций,
- автоматическое – производящее без участия человека все изм. операции,

Измерительные принадлежности – это вспомогательные средства измерений величин. Они необходимы для вычисления поправок к результатам измерений, если требуется высокая степень точности.

По метрологическому назначению СИ делят на два вида – рабочие средства измерений и эталоны.

Рабочие средства измерений применяют для определения характеристик технических устройств и технологических процессов.

Эталон – это высокоточная мера, предназначенная для воспроизведения и хранения единицы величины с целью передачи её размера другим средствам измерений.

Эталоны классифицируют на: *первичный эталон* (с наивысшей точностью) (бывает национальный или международный), *вторичные эталоны*, *рабочие эталоны* (низкого разряда).

1.8. Измерительные преобразователи и их классификация

Измерительные преобразователи (ИП) различают *первичные* или *датчики* и *вторичные*.

Первичный измерительный преобразователь, на который непосредственно воздействует измеряемая физическая величина.

Вторичные измерительные преобразователи, осуществляющие связь первичного ИП с вторичными устройствами (это приборы, сигнализаторы, регуляторы, компьютеры).

Первичный ИП воспринимает измеряемую физическую величину и преобразует ее в унифицированную величину удобную для передачи и обработки. Их можно классифицировать по ряду признаков:

- по типу преобразования измеряемой физической величины в выходной сигнал (*параметрические* (R , C , L) и *генераторные* (U , I))
- по виду измеряемой величины (преобразователи температуры, давления, плотности и др.);
- по виду используемой энергии (электрические, пневматические, механические, пневмоэлектрические, пневмомеханические и др.);
- по принципу действия (непрерывные, импульсные, непрерывно-импульсные и др.);

– по виду и характеру выходного сигнала (линейные, нелинейные и др.).

Используемые в ИП принципы измерения также могут быть использованы в качестве классифицирующего признака. При этом для электрических ИП различают:

– емкостные преобразователи - превращающие изменение измеряемой величины в изменение емкости;

– пьезоэлектрические ИП – превращающие изменение измеряемой величины в электростатический заряд или напряжение, возникающее в некоторых материалах при их механическом напряжении;

– электромагнитные ИП - в которых ЭДС генерируется вдоль проводника, когда проводник движется через магнитное поле, вдоль него генерируется ЭДС (индуктивное преобразование, преобразование магнитного сопротивления);

– электромеханические ИП – они выполняются в форме механического контактного устройства, работающего под действием изменяющейся физической величины, измерение которой осуществляется;

– фотоэлектрические ИП – это преобразователи, которые реагируют на электромагнитное излучение, падающее на поверхность преобразующего элемента;

– резисторные ИП – принцип действия основан на преобразовании значения измеряемой величины в изменение сопротивления.

Вторичные ИП подразделяются на промежуточные, передающие и масштабные ИП, изменяющие величину в заданное число раз.

1.9. Вопросы для самостоятельной работы

1. В чем необходимость изучения дисциплины «Физические основы физических измерений»?
2. Поясните историю возникновения и развития измерений.
3. Перечислите основные понятия технических измерений.
4. Перечислите основные единицы системы СИ.
5. Дайте определения информации, сообщения, сигнала.
6. Каковы особые требования к преобразованию сообщений в сигналы?
7. Что такое детерминированные и случайные сигналы?
8. Что такое аналоговые и цифровые сигналы?
9. Охарактеризуйте виды и методы измерения физических величин.
10. Приведите классификацию средств измерений.
11. Приведите классификацию измерительных преобразователей.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

2.1. Классификация механических величин

Линейные и угловые размеры, перемещения принято относить к *первой группе* механических величин. Как правило, это изометрические параметры различных деталей в обрабатывающей промышленности, характеристики профилей и шероховатостей поверхностей, уровни сыпучих веществ и жидкостей в различных сосудах (баках, танкерах, паровых котлах и т. п.), перемещения режущего инструмента относительно обрабатываемой детали, параметры износа трущихся частей различных механизмов, биения валов, расстояния и т. д.

Диапазон, охватываемый величинами этой группы, простирается от долей микрона до тысяч метров, т. е. составляет примерно десять порядков. Диапазон угловых размеров равен 3 – 4 порядкам.

Ко *второй* группе относятся различного рода силовые воздействия. Это механические напряжения в деталях и конструкциях машин и сооружений, силы, крутящие моменты, давления жидкостей и газов, акустические шумы, разности давлений и т. п. Диапазоны значений величин этой группы, как правило, весьма широки. Например, в вакуумной технике приходится измерять давления от 10^{-8} Па (10^{-10} мм рт. ст.) до 10^8 Па и выше в технике высоких давлений, следовательно, диапазон давлений охватывает 16 порядков. Примерно такой же диапазон занимают значения сил, встречающихся в технике и научных исследованиях ($10^{-8} \dots 10^8$) Н.

Третью группу механических величин представляют так называемые параметры движения. Это перемещения объектов в пространстве, линейные и угловые скорости и ускорения перемещений. Значения параметров этой группы могут достигать астрономических цифр (космические расстояния и скорости). В эту группу входят также параметры вибраций (вибрационные перемещения, скорости и ускорения), скорости вращения валов и т. д.

2.2. Механические средства измерения перемещений, линейных и угловых размеров

Конструкция подавляющего большинства механических средств измерения состоит из последовательно расположенных элементов и устройств, каждое из которых в этой последовательности выполняет опреде-

ленную задачу при измерении. Для того чтобы в дальнейшем при изучении средств измерения было легче представлять их действие, рассмотрим коротко эти устройства и их назначения (ГОСТ 16263-70).

Основание измерительного средства – это конструктивный элемент, на базе которого смонтированы все элементы данного действующего средства измерения. Например, штанга штангенциркуля, скоба микрометра, корпус индикатора часового типа.

Воспринимающий элемент – это часть средства измерения, которая осуществляет его соприкосновение с объектом измерения и воспринимает величину этого объекта, например измерительные губки штангенциркуля, измерительный наконечник индикатора. Часть воспринимающего элемента, непосредственно касающаяся поверхности объекта, иногда называют чувствительным элементом.

Размерный элемент – это одна из деталей средства измерения, которая обладает собственным точным, обычно многозначным, размером, с величиной которого в процессе измерения непосредственно сопоставляется воспринятая средством измерения величина объекта измерения (например, штанга со шкалой штангенциркуля: размер детали воспринятый губками, сравнивается с ней).

Преобразующее устройство – это внутренний механизм или элемент средства измерения, который преобразует (видоизменяет) малые перемещения, воспринятые от объекта измерения, в большие перемещения на отсчетном устройстве так, что эти большие перемещения исполнитель может непосредственно наблюдать и отсчитывать (например, зубчатая передача в индикаторе часового типа).

Отсчетное устройство – создаёт возможность отсчитывать показания средства измерения. В большинстве случаев отсчетные устройства имеют шкалу и указатель, которым служит отдельный штрих, группа штрихов или стрелка. В последнее время распространяются средства измерения с цифровыми отсчетными устройствами. Примером отсчетного устройства может быть нониус штангенциркуля, круглая шкала индикатора и стрелка индикатора часового типа, цифровое табло прибора с цифровой индикацией.

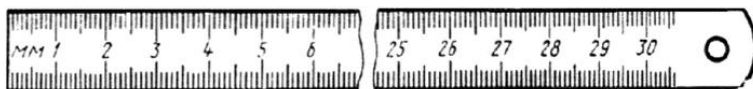
В зависимости от назначения и принципа действия конкретного средства измерения и его конструкции используются те или иные комплексы этих устройств и элементов, составляющих структуру этого средства измерения.

2.3. Линейки измерительные металлические

Линейка измерительная представляет собой гибкую стальную полосу с нанесенной на ней прямой шкалой с ценой деления 1 мм. Линейки изготовляют со шкалами от 0 до 150 мм, от 0 до 300 мм (рис. 2.1 а), от 0 до 500 мм (рис. 2.1 б) и от 0 до 1000 мм (рис. 2.1 в) (ГОСТ 427-75). Началом шкалы линейки является плоскость левого торца полосы; торец расположен перпендикулярно продольному ребру полосы. С торцом совпадает середина нулевого штриха шкалы. Конец штрихов шкалы выходит на продольное ребро. Каждый 5-й и 10-й штрих шкалы удлинён, каждый 10-й снабжен цифрой, показывающей расстояние в сантиметрах от этого штриха до начала шкалы. Второй, правый конец полосы закруглен и снабжен отверстием для подвешивания линейки.

Отклонения от номинальных значений длин сантиметровых делений шкалы линейек не превышают 0,10 мм, а отклонения от номинальных значений длин миллиметровых делений шкалы линейек не превышают $\pm 0,05$ мм.

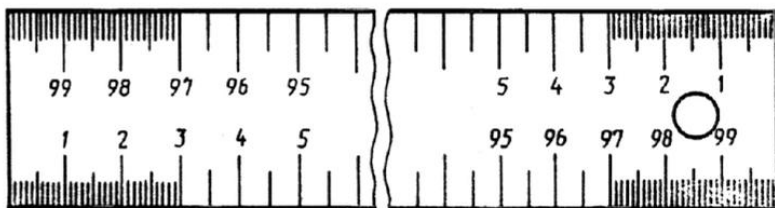
Линейки имеют антикоррозионное гальваническое хромовое покрытие по ГОСТ 9.306.



а)



б)



в)

Рис. 2.1. Линейки измерительные металлические

2.4. Штангенциркуль

На рисунке 2.2 показан штангенциркуль ШЦ-1, состоящий из штанги с линейкой, которая имеет шкалу с ценой деления 1 мм. По штанге 1 передвигается рамка 3 со вспомогательной шкалой-нониусом 5. Штангенциркуль снабжён губками 2 для наружных и внутренних измерений, а также зажимом 4. К рамке 3 прикреплена линейка глубиномера 6.

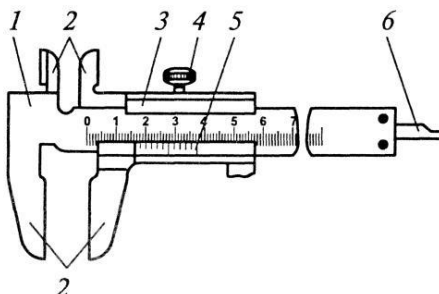


Рис. 2.2. Штангенциркуль ШЦ-1

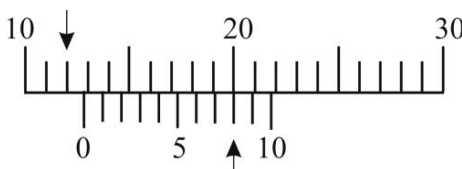


Рис. 2.3. Отсчет по нониусу (12,8 мм)

Нониус 5 (см. рис. 2.3) служит вспомогательной шкалой, позволяющей отсчитывать доли деления шкалы штанги. Он наносится на скошенной поверхности рамки или отдельной пластинке, укрепленной в окне рамки.

Изготавливают и используют штангенциркули трех типов: ШЦ-1 с ценой деления 0,1 мм, ШЦ-2 с ценой деления 0,05 мм и ШЦ-3 с ценой деления 0,1; 0,05; 0,02 мм, а также индикаторные штангенциркули с ценой деления индикатора 0,1; 0,05; 0,02 мм.

Порядок отсчета показаний штангенциркуля по шкалам штанги и нониуса:

- читают число целых миллиметров – для этого находят на шкале штанги штрих, ближайший меньший к нулевому штриху нониуса, и запоминают его числовое значение (на рис. 2.2 – 12 мм);

- читают долю миллиметра в отсчете – для этого находят на шкале нониуса штрих, совпадающий со штрихом шкалы штанги, запоминают его порядковый номер и умножают этот номер на величину отсчета по данно-

му нониусу. Это будет искомая доля миллиметра в отсчете (на рис. 2.3 совпадающий штрих нониуса имеет номер 8, а величина отсчета по нониусу равна 0,1 мм, значит, доля миллиметра в отсчете здесь равна $8 \times 0,1 \text{ мм} = 0,8 \text{ мм}$).

Погрешности измерения штангенциркулем

Погрешность измерения зависит в значительной мере от величины отсчета и значения измеряемого размера. Погрешность измерения штангенциркулем наружных размеров до 500 мм при величине отсчета 0,05 мм будет составлять 0,1 мм (т. е. равна удвоенному значению величины отсчета). При измерении внутренних размеров тем же штангенциркулем погрешность измерения составляет 0,15...0,25 мм для этого же диапазона размеров. При измерении штангенциркулем с отсчетом 0,1 мм наружных размеров в том же диапазоне, т. е. до 500 мм, погрешность составляет 0,15...0,25 мм, а для внутренних размеров 0,2...0,3 мм.

Необходимо обратить внимание на то, что указаны погрешности измерения, а не погрешности измерительного средства.

Погрешность только самого штангенциркуля в условиях его проверки, т. е. погрешность, которая нормируется, будет меньше (обычно не более величины отсчета). Погрешность измерения штангенциркулем возникает в основном от двух причин – это, в первую очередь, погрешность отсчета, вызванная параллаксом, а для штангенциркуля еще и погрешность от нарушения принципа Аббе.

Параллакс (от греческого слова *parallaxis* – отклонение) – это видимое изменение относительного положения предметов вследствие перемещения глаза наблюдателя.

Это изменение положения предметов имеет место при отсчете, когда основная шкала и шкала нониуса расположены не в одной плоскости. Поэтому совпадение штрихов может казаться по-разному, в зависимости от того, под каким углом наблюдатель производит отсчет.

Принцип Аббе заключается в том, что при измерении размера методом сравнения с мерой погрешность измерения будет меньше, если меру и измеряемый размер располагать на одной прямой (последовательно, а не параллельно). В штангенциркуле не соблюдается принцип Аббе, поскольку шкала и нониус располагаются на линии, параллельной линии измерения, на детали. Погрешность возникает из-за того, что при параллельном расположении трудно обеспечить перпендикулярность измерительных поверхностей, как при изготовлении, так и при использовании из-за непрямолинейности направляющих (при перемещении рамки по штанге). При измерении цилиндрических или сферических деталей, когда контакт происходит у концов измерительных губок штангенциркуля, усилие поджима создает момент сил, который выбирает зазор между рамкой и штангой. Этим нарушается

перпендикулярность измерительных поверхностей, которая вносит погрешность в результат измерения.

2.5. Микрометр гладкий

Основанием микрометра (рис. 2.4 *а*) является скоба 1, а передаточным (преобразующим) устройством служит винтовая пара, состоящая из микрометрического винта 3 и микрометрической гайки, укрепленной внутри стебля 5, которые часто называют микропарой. В скобу 1 запрессованы пятка 2 и стебель 5. Измеряемая деталь охватывается поверхностями микровинта 3 и пятки 2.

Барабан 6 присоединен к микровинту 3 корпусом трещотки 7. Для приближения микровинта 3 к пятке 2 его вращают за барабан или за трещотку 8 по часовой стрелке (от себя), а для удаления микровинта от пятки его вращают против часовой стрелки (на себя). Закрепляют микровинт в требуемом положении стопором 4.

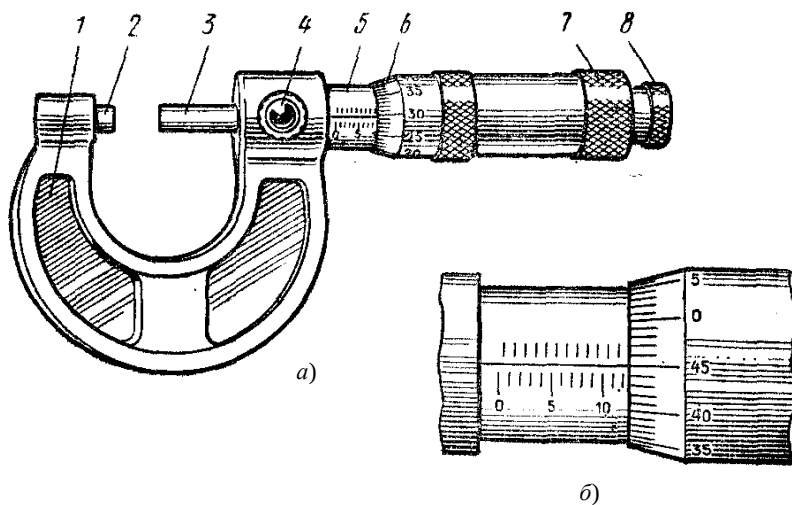


Рис. 2.4. Микрометр гладкий

При плотном соприкосновении измерительных поверхностей микрометра с поверхностью измеряемой детали трещотка проворачивается с легким треском, при этом ограничивается измерительное усилие микрометра. Результат измерения размера микрометра отсчитывается как сумма отсчётов по шкале стебля 5 и барабана 6. Следует помнить, что цена деления шкалы стебля 0,5 мм, а шкалы барабана 0,01 мм. Шаг резьбы микро-

пары (микровинт и микрогайка) $P = 0,5$ мм. Число делений барабана 50. Если повернуть барабан на одно деление его шкалы, то торец микровинта переместится относительно пятки на 0,01 мм, т.к. $0,5 \text{ мм}/50 = 0,01 \text{ мм}$.

В целях повышения удобства и ускорения отсчёта показаний микрометра выпускается гладкий микрометр с цифровой индикацией.

Показания по шкалам гладкого микрометра отсчитывают в следующем порядке: сначала по шкале стебля 5 читают значение штриха, ближайшего к торцу скоса барабана 6 (на рис. 2.3 б – это число 12,00 мм). Затем по шкале барабана читают значение штриха, ближайшего к продольному штриху стебля (на рис. 2.3 б – это число 0,45 мм). Сложив оба значения, получают показание микрометра (на рис. 2.3 б – это значение 12,45 мм).

Диапазоны измерения гладкого микрометра: 0...24 мм; 25...50 мм и т.д. до 275...300 мм, дальше 300...400; 400...500 и 500...600 мм.

Для установки на ноль все микрометры, кроме 0...25 мм, снабжаются установочными мерами, размер которых равен нижнему пределу измерения. Цена деления микрометра – 0,01 мм.

2.6. Погрешности измерения микрометром

В общем случае погрешность измерения микрометром возникает от погрешности микрометра, от установочной меры или блока концевых мер, от непараллельности измерительных поверхностей, от разгиба скобы под действием усилия, погрешности от отсчета показаний, погрешности от температурных и контактных деформаций.

Погрешность от микрометра проявляется полностью в том случае, если измерение производится с отсчетом полного размера по микропаре. Обычно погрешность микрометров нормируется равной от 4 до 10 мкм в зависимости от диапазона измерений при проверке по концевым мерам длины.

Погрешность от установочных мер входит в погрешность измерения микрометром с диапазоном измерения св. 25 мм. Точность измерения можно повысить при установке микрометра по блоку концевых мер. В этом случае погрешность микропары оказывает влияние только на небольшом используемом интервале. Экспериментально установлено, что эта величина находится в пределах 2 мкм.

Погрешность от разгиба скобы происходит из-за непостоянства измерительного усилия (колебания измерительного усилия порядка 200 сН). Обычно нормируется величина разгиба скобы под действием усилия в 10 Н в пределах 2...12 мкм, т. е. колебание усилия может вызвать погрешность, равную 0,2 от нормируемой (0,4...2,4 мкм). Эта относительно небольшая погрешность имеет место, когда при работе пользуются трещот-

кой. Однако очень часто при работе не пользуются трещоткой и этим создают очень большую величину перепада измерительного усилия (30 Н и более), а это, в свою очередь, приводит к появлению большой погрешности и от разгиба скобы. Она составляет 0,01...0,02 мм и более.

Погрешность от отсчета показаний возникает из-за параллакса (шкалы на стебле и барабане расположены на разных плоскостях) и трудности отсчета. Эта погрешность составляет ориентировочно 2 мкм.

Погрешность от температурных деформаций связана:

а) с деформацией из-за разности первоначальных температур детали, установочной меры и микрометра, с разными коэффициентами температурного расширения;

б) с деформацией микрометра, возникающей из-за нагрева его руками оператора.

Погрешность от нагрева руками нельзя практически определить в каждый конкретный момент времени, так как установить зависимость между температурой на поверхности микрометра и его деформациями не представляется возможным.

Величина и знак деформаций зависят от положения рук оператора на скобе. Например, если расположить руки на внутренней части скобы, т. е. обращенной к детали, то помимо общего изменения размера скобы произойдет ее разгиб за счет того, что температура, а, следовательно, и расширение материала с внутренней стороны скобы будет больше, чем с наружной. При расположении рук оператора с наружной стороны скобы помимо общего расширения скобы произойдет сжатие, т. е. эти деформации частично компенсируют друг друга.

Для уменьшения влияния рассмотренных деформаций на погрешность измерения обычно большие скобы оснащают теплоизоляционными накладками.

Погрешность от контактных деформаций возникает в основном при измерении сферических поверхностей (точечный контакт) из-за измерительного усилия. При измерении сферы радиусом 5 мм величина контактной деформации достигает 3 мкм, с радиусом свыше 5 мм – 2 мкм.

Общая погрешность измерения микрометра с учетом влияния рассмотренных составляющих погрешности измерения находится в пределах от 5 до 50 мкм в зависимости от типоразмера микрометра (первая цифра для микрометра 0...25 мм, вторая – для микрометра 400...500 мм). Эти значения соответствуют определенным температурным условиям при использовании 65 установочных мер, а микрометр при работе находится в руках. При установке микрометра в специальный штатив или при обеспечении надежной изоляции скобы от тепла рук оператора, погрешность измерения для типоразмеров, начиная с 25...50 мм, значительно сокращается (в 2 раза и более).

Проверка микрометров. Проверку микрометров производят с помощью концевых мер длины. При этом выясняется погрешность измерения микрометром размера детали с плоскими поверхностями. В связи с этим отдельно проверяют плоскостность и параллельность измерительных поверхностей с помощью плоскопараллельных стеклянных пластин.

2.7. Индикаторы часового типа

Внешне (да и по внутреннему устройству) (рис. 2.5) индикатор похож на карманные часы, почему и закрепилось за ним такое название (но неправильно называть его индикаторные часы – время им не измеряют).

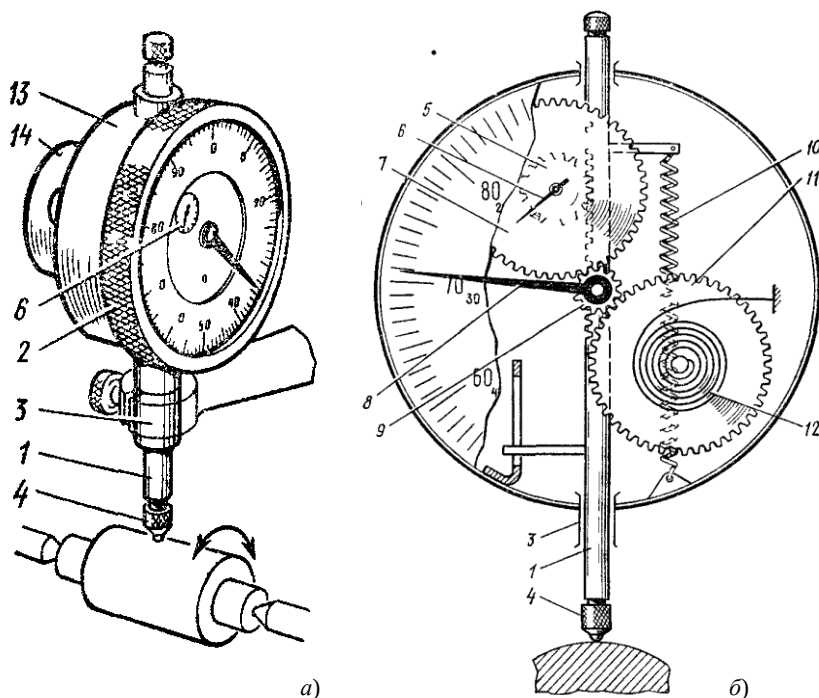


Рис. 2.5. Индикатор часового типа:
а – общий вид, б – схема зубчатой передачи

Конструкция индикатора часового типа представляет собой измерительную головку с продольным перемещением наконечника. Основанием индикатора является корпус 13, внутри которого смонтирован преобразующий механизм – реечно-зубчатая передача. Через

корпус 13 проходит измерительный стержень 1 с наконечником 4. На стержне нарезана зубчатая рейка. Движения измерительного стержня-рейки 1 передаются зубчатыми колёсами – реечным 5, передаточным 7 и трубкой 9 основной стрелке 8, величина поворота которой отсчитывается по круглой шкале-циферблату. Для установки на «0» круглая шкала поворачивается ободком 2.

Круглая шкала индикатора часового типа состоит из 100 делений, цена каждого деления – 0,01 мм. Это означает, что при перемещении измерительного наконечника на 0,01 мм стрелка индикатора перейдёт на одно деление шкалы.

Погрешность измерения индикатором. Погрешности индикатора нормируются в зависимости от используемого диапазона показаний (в зависимости от перемещения измерительного стержня). Обычно на участке в 0,1 мм погрешность находится в пределах 5...8 мкм; на участке в 1...2 мм – 10...15 мкм; на участке до 3 мм – до 15 мкм; на участке до 5...10 мм погрешность находится в пределах 18...22 мкм.

Таким образом, на небольшом участке погрешность индикатора находится в пределах цены деления. На больших пределах погрешность превышает цену деления. Это показывает, что отсчитывать доли от цены деления (т. е. тысячные доли миллиметра – микрометры) на индикаторе часового типа нельзя.

Применение индикаторов часового типа. Как правило, их применяют как самостоятельное средство измерения для прямого отсчета, так и в составе различных измерительных приспособлений и устройств. С их помощью измеряют различные геометрические размеры, например, овальность валов, как показано на рис. 2.5 а, неровности и непараллельности обработки поверхностей, биения валов и вращающихся деталей, определяют верхнюю мертвую точку поршня в двигателе внутреннего сгорания. Производят относительные измерения и контроль отклонений от заданных размеров. В качестве фиксатора индикатора применяют стойки, подставки и штативы. Для обеспечения жесткости и минимальных деформаций при измерении стойки делают массивными. Оснащение индикатора стойкой и магнитным штативом (рис. 2.6 а), позволяет прикреплять его к стальным элементам станка и другому оборудованию на горизонтальной, вертикальной или наклонной поверхности и проверять, например, биение тормозного диска автомобиля (рис. 2.6 б). Применяют индикаторы часового типа в составе приспособления для измерения толщины упорных полуколец двигателей внутреннего сгорания (рис. 2.6 в), для измерения толщины плоских деталей (рис. 2.6 г), в приспособлениях измерения толщины и высоты вкладышей скольжения и многих других измерительных устройствах применяемых на машиностроительных заводах.



а)



б)



в)



г)

Рис. 2.6. Приспособления с индикатором часового типа

2.8. Контроль калибрами

Для выполнения операций технического контроля в условиях массового и крупносерийного производства широко используют контрольные инструменты в виде калибров. Калибры – это тела или устройства, предназначенные для проверки соответствия размеров изделий или их конфигурации установленным допускам.

С помощью предельных калибров определяют не численное значение контролируемого параметра, а выясняют, выходит ли этот параметр за предельные значения или находится между двумя допустимыми. При контроле деталь считается годной, если проходная сторона калибра (ПР) под действием усилия, примерно равного массе калибра, проходит, а непроходная сторона калибра (НЕ) не проходит по контролируемой поверхности детали. Если ПР не проходит, деталь относят к бракованным с исправимым браком. Если НЕ проходит, деталь относят к бракованным с неисправимым браком.

Виды гладких калибров для цилиндрических отверстий и валов устанавливает ГОСТ 24851–81. В системе ИСО гладкие калибры стандартизованы ИСО-R1938 –1971.

Стандарт предусматривает следующие гладкие калибры для валов и относящиеся к ним контрольные калибры:

ПР – проходной калибр-скоба;

НЕ – непроходной калибр-скоба;

К-ПР – контрольный проходной калибр для нового гладкого калибр-скобы;

К-НЕ – контрольный непроходной калибр для нового гладкого калибр-скобы;

К-И – контрольный калибр для контроля износа гладкого проходного калибр-скобы.

Для контроля отверстий предусмотрены:

ПР – проходной калибр-пробка;

НЕ – непроходной калибр-пробка.

Калибры отличаются разнообразием конструкций и исполнений. Для примера на рисунке 2.7 показаны калибр-скобы для контроля валов листовые односторонние (рис. 2.7 а), штампованные односторонние (рис. 2.7 б) и двусторонние (рис. 2.7 в) и односторонние с ручкой (рис. 2.7 г).

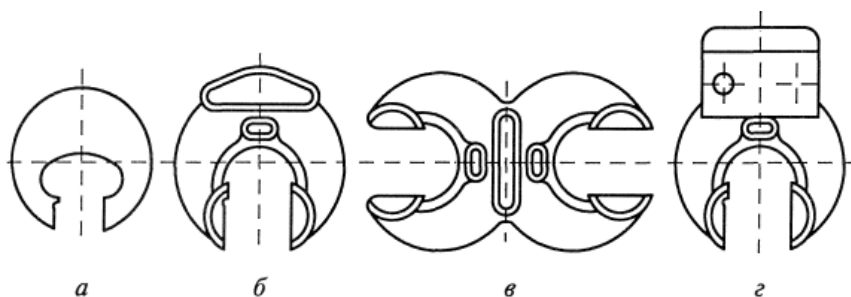


Рис. 2.7. Калибр-скобы

2.9. Оптико-механические средства измерения длины, перемещений и размеров

Оптико-механическими называются средства измерения геометрических величин, действие которых основано на использовании законов геометрической оптики (измерительные микроскопы, оптиметры) или явлений интерференции когерентных пучков света (интерференционные микроскопы).

Распространенными приборами для линейных и угловых измерений в микроэлектронике и смежных отраслях являются измерительные проекторы и измерительные микроскопы.

Измерительные проекторы предназначены для проецирования теневого изображения (контура) изделий на экран и измерения их линейных и угловых размеров путем непосредственного сравнения теневого изображения с чертежом, исполненным в соответствующем масштабе, или с вычерченным контуром изделия. Выпускаются проекторы с несколькими размерами экранов (от 250×250 , до 600×700 мм).

Стол проектора, на котором устанавливается изделие, имеет возможность перемещаться в продольном, поперечном направлениях и по вертикали. Перемещение стола отсчитывается по соответствующим шкалам с ценой деления $0,01 \dots 0,002$ мм. Погрешность при измерении длин с помощью проектора не превышает $\pm(0,003 \dots 0,005)$ мм.

Некоторые типы современных проекторов снабжаются устройствами цифрового отсчета перемещения измерительного стола с соответствующими преобразователями.

Измерительные микроскопы предназначены для измерений длин и углов различных деталей сложной формы в прямоугольной или полярной системах координат.

Различают несколько типов микроскопов: малый микроскоп инструментальный, большой микроскоп инструментальный, а также универсальный микроскоп.

Несмотря на конструктивные различия принципиальная схема измерения во всех микроскопах общая – визирование различных точек деталей, перемещаемых для этого по взаимно перпендикулярным направлениям, и измерение этих перемещений посредством микрометрических или иных отсчетных устройств. Для обеспечения лучшего визирования микроскопы снабжаются сменными объективами различной степени увеличения.

Измерительный микроскоп состоит из основания, на котором укреплены две меры длины вдоль двух взаимно перпендикулярных осей координат, из стола для закрепления измеряемого изделия и визирного микроскопа.

Измеряемое изделие устанавливается на столе микроскопа. Точки отсчета определяются по показаниям визирного микроскопа. При визировании ось микроскопа совмещается со штрихами на изделии или с его краями. Для этого перемещают стол с изделием или сам микроскоп относительно изделия. Перемещение соответствует измеряемой длине или расстоянию и определяется как разность между начальным и конечным положением стола. Для удобства работы выпускают измерительные микроскопы с цифровым отсчетом и внешней установкой показания на нуль. При отсчете начального показания от нуля результат измерения фиксируется на табло сразу без пересчета.

На рисунке 2.8 показана схема компаратора на базе двух измерительных микроскопов.

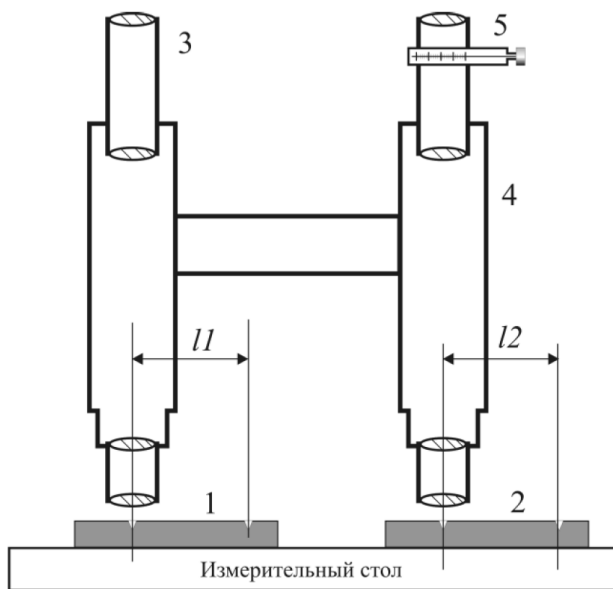


Рис. 2.8. Схема компаратора

Рабочий эталон 1, длиной l_1 (см. рис. 2.8) сравнивается с объектом контроля 2 длиной $l_2 = l_1 + \Delta l$. В исходном состоянии в перекрестье окуляров обоих микроскопов 3 и 4 находятся исходные точки (как на рис. 2.8). Смещением измерительного стола добиваются попадания в перекрестье левого микроскопа 3 конечной точки рабочего эталона. Далее смещением микрометрического винта 5 окуляра правого микроскопа 4 с перекрестьем этого микроскопа совмещают конечную точку объекта контроля 2. По пока-

заниям микрометрического винта определяют разность длин объекта контроля и эталона.

Высокую точность измерений перемещений позволяют получить методы, основанные на применении оптоэлектрических преобразователей и источников оптического излучения, например методы раstra и муара.

В методе раstra используются две плоские пластины с параллельными штрихами. Расстояние между штрихами на каждой пластине постоянно, но для двух пластин незначительно отличается. При наложении пластин (растр) друг на друга и их просвечивании наблюдаются зоны сгущения и разряжения штрихов (рис. 2.9 *а*). Перемещение одного раstra относительно другого в направлении, перпендикулярном штрихам, вызывает перемещение указанных зон сгущения штрихов в том же направлении, но значение этого перемещения y оказывается гораздо больше, чем значение измеряемого перемещения x , т. е. происходит оптическая редукция. Если расстояния между штрихами на пластинах равны a и b (рис. 2.9 *а*) тогда

$$\text{перемещение } y = \frac{x}{1 - b/a}.$$

В методе муара растры на двух пластинах имеют одинаковый шаг, но расположены под небольшим углом α друг к другу (рис. 2.9 *б*). При наложении растров и их просвечивании наблюдаются светлые и темные полосы, идущие поперек штрихов и называемые комбинационными, или муаровыми, полосами. Перемещение одного из растров вызывает значительно большее смещение муаровых полос в направлении, перпендикулярном направлению движения раstra, т. е. также происходит оптическая редукция. Значения этих перемещений связаны соотношением $y = x / \sin \alpha$.

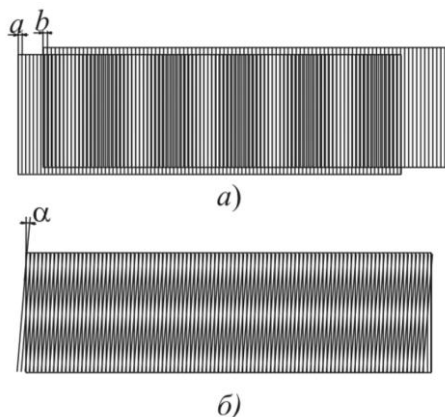


Рис. 2.9. Растровый и муаровый преобразователь перемещений

Наличие оптической редукции в методах раstra и муара позволяет достигнуть высокой чувствительности к измеряемому перемещению.

При измерениях перемещений от долей микрометра до метра используются лазерные интерферометры. В этих приборах производится сложение двух световых потоков, излучаемых лазером, один из которых проходит постоянный путь, а второй – путь, зависящий от измеряемого расстояния. Сложение потоков приводит к усилению или ослаблению суммарного потока в зависимости от разности фаз потоков, т.е. в зависимости от измеряемого расстояния.

На рисунке 2.10 показано устройство лазерного интерферометра. Лазер излучает световой поток Φ , который разделяется на два потока (Φ_1 и Φ_2) с помощью полупрозрачного наклонного зеркала 2.

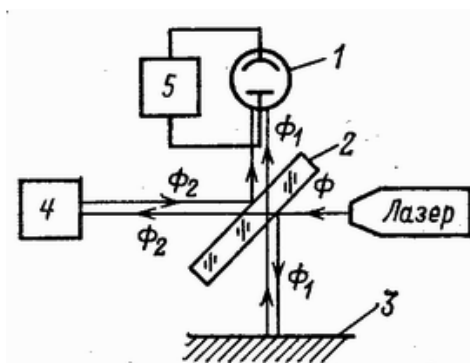


Рис. 2.10. Лазерный интерферометр

Поток Φ_1 , отражаясь от зеркала 2, а затем от зеркала 3, попадает на фотоэлемент 1. Поток Φ_2 проходит через зеркало 2, отражается от объекта 4, затем от зеркала 2 и попадает на фотоэлемент 1. В фотоэлементе 1 потоки складываются, и при изменении расстояния до объекта 4 периодически будет изменяться сигнал (фототок) фотоэлемента. Число подсчитанных с помощью счетчика 5 периодов k фототока и перемещение объекта на расстояние x связаны соотношением

$$x = k\lambda/2,$$

где λ – длина волны света.

При измерении перемещений до 1 м погрешность составляет 0,1...1 мкм.

Существуют интерферометры с визуальным отсчетом показаний по шкале, наблюдаемой в окуляр. В качестве указателя используется черная интерференционная полоса по обе стороны которой видны окрашенные полосы убывающей интенсивности. Изменение размеров объекта контро-

ля или его перемещение вызывает смещение черной полосы относительно отметок шкалы отсчетного устройства, проградуированной в единицах длины.

Для измерения больших расстояний (сотен метров и более) применяются лазерные дальномеры, работающие в импульсном или непрерывном режиме. В первом случае измеряется интервал времени между излученным и отраженным импульсами, во втором – сдвиг фаз между излученным и отраженным сигналами.

2.10. Измерение шероховатостей. Профилометр.

Поверхность детали после механической обработки имеет следы режущего инструмента в форме микронеровностей сочетающих выступы и впадины (рис. 2.11). Величину микронеровностей реальной поверхности (в мкм) характеризует шероховатость поверхности, которая определяется как отклонение от идеально гладкой поверхности обработанной детали.

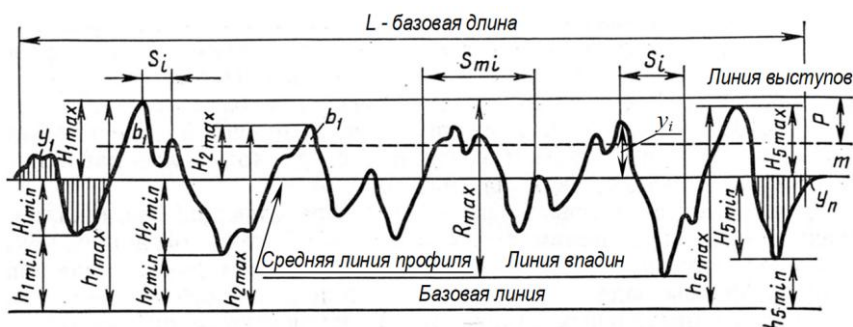


Рис. 2.11. Профиль и параметры рельефа реальной поверхности

Важными характеристиками шероховатости обработанной поверхности являются численные значения параметров рельефа (рис. 2.11): L – базовая длина профиля; $h_{i\max}$ – расстояние от высших точек пяти наибольших максимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $h_{i\min}$ – расстояние от низших точек пяти наибольших минимумов до линии, параллельной средней и не пересекающей профиль; $H_{i\max}$ – отклонение пяти наибольших максимумов профиля; $H_{i\min}$ – отклонение пяти наибольших минимумов профиля; $R_{\max}$ – наибольшая высота профиля микронеровностей; S_i – средний шаг местных выступов профиля; S_{mi} – среднее арифметическое значение шага неровности; y_i – отклонения профиля от средней линии профиля; t ; p – уровень сечения профиля; b_n – длина отрезков, отсекаемых на уровне p .

Качество поверхности по ГОСТ 2789-73 и международным стандартам оценивается шестью метрическими параметрами. На машиностроительных чертежах используют, как правило, только два из них:

Ra – среднее арифметическое значение отклонений профиля (average roughness, ISO 4287/1), т. е. среднее арифметическое значение ординат y_i некоторого количества точек, выбранных на базовой длине L ;

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам (ten point height, ISO 4287/0), т. е. сумма средних абсолютных значений высот пяти наибольших выступов и глубин пяти наибольших впадин профиля в пределах базовой длины L , выражает шероховатость поверхности (по аналогии с методом max – min) по выбранным пяти координатам максимальных высот и впадин по формуле:

$$Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 h_{i \max} - \sum_{i=1}^5 h_{i \min} \right) \text{ или } Rz = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right).$$

Шероховатость обработанных поверхностей оценивают двумя способами: качественно – путем визуального сравнения обработанной поверхности с эталонными образцами шероховатости и количественно профилометрами и профилографами, позволяющими определять параметры шероховатости поверхности по ее преобразованным профилям.

Результатом работы профилометра являются числовые значения Ra и Rz. Погрешность профилометров находится в диапазоне $\pm 10 \dots \pm 20$ %. Результаты измерения профилографа, представляются в виде кривой, характеризующей реальный профиль поверхности, обработку которой проводят графоаналитическим или численным методом и получают значения Ra и Rz. Погрешность прибора не превышает $\pm 5 \dots \pm 10$ %. Применяются также комбинированные приборы профилографы-профилометры позволяющие оценивать шероховатость и волнистость поверхностей.

В основу принципа действия профилометров и профилографов положен контактный и бесконтактный метод измерения показателей шероховатости обработанной поверхности.

При контактном методе по измеряемой поверхности перемещается измерительный шуп, который заканчивается твёрдым наконечником (алмазной или корундовой иглой). При движении шупа по микронеровностям (выступам и впадинам), возникают механические колебания измерительной головки иглы. Амплитуда колебаний шупа преобразуется в электрический сигнал, усиливается и преобразуется в показатель шероховатости.

В основе бесконтактных методов измерения шероховатости лежит оптический метод, который включает целую группу методов: метод светового свечения и теневой метод, микроинтерференционный метод, растровый метод и т.д. К этому варианту может относиться метод оптического или лазерного сканирования поверхности.

Большинство моделей выпускаемых профилометров ориентируется на контактный метод. Это объясняется высокой точностью результата, который можно получить уменьшением контактной площади алмазной иглы (иногда применяют и иглы из твёрдого сплава). В то же время, при использовании оптических профилометров бесконтактного типа требуется работать только с образцами, поверхность которых очищена от всех поверхностных загрязнений, искажающих результат замеров.

Последовательность измерений шероховатости определяют ГОСТ 2789-73, ГОСТ 19300-86 и ГОСТ 27964-88 (ИСО 4287/2084).

Исследование шероховатости поверхностей контактным методом производится в несколько этапов: так, сначала профиль исследуемого объекта «прогоняется» несколько раз в разных местах, а только затем, на основании серии измерений вычисляется усредненное значение параметра, характеризующегося как количественное выражение неровности относительно длины участка.

Главное условие исследования шероховатости поверхностей контактным методом является отсутствие следов движения щупа в виде царапин. Это определяется типом и твердостью исследуемого материала (сталь, алюминий, медь, пластик и.д.), а также усилием на щуп. Поэтому максимальные значения статического измерительного усилия и постоянной изменения измерительного усилия выбирают в зависимости от радиуса щупа. Они не должны превышать значений, указанных в табл.1.

Таблица 1

Номинальное значение радиуса кривизны вершины щупа, мкм	Максимальное значение статического измерительного усилия, Н	Максимальное значение постоянной изменения измерительного усилия, Н/м
2	0,0007	35
5	0,004	200
10		

Допускается увеличение статического измерительного усилия до 0,016 Н для профилометров с наименьшим значением измеряемого параметра R_a не менее 2 мкм, для профилографов с наименьшим значением ординаты профиля не менее 1,5 мкм, а также для датчиков, предназначенных для измерений, при которых игла датчика не направлена вертикально

вниз. В профилографах и профилометрах, имеющих датчик с опорой на измеряемую поверхность, радиус кривизны рабочей части опоры в плоскости, перпендикулярной контролируемой поверхности и параллельной направлению движения датчика, должен быть не менее пятидесяти значений максимальной отсечки шага. При измерении с отсечкой шага 2,5 мм используют вспомогательную направляющую поверхность.

В зависимости от назначения устанавливают следующие типы профилографов и профилометров:

I – цеховые (портативные, предназначенные для межоперационного контроля) (рис. 2.12 а) ;

II – цеховые (стационарно-переносные для контроля окончательно обработанных поверхностей) (рис. 2.12 б) ;

III – лабораторные (стационарные) (рис. 2.12 в) .

Вид различных профилометров показан на рис. 2.12.



а)



б)



в)

Рис. 2.12. Портативный, переносной профилометры и стационарный профилограф

Профилографы и профилометры с различными вариантами исполнения строятся по модульному принципу, обеспечивающему путем сопряжения различных модулей измерение шероховатости разнообразных форм поверхностей, в том числе прямолинейных, криволинейных различной конфигурации, расположенных в труднодоступных местах (пазах, глухих отверстиях) и т.п. Изготавливаются профилометры также в виде отдельных портативных приборов. Профилографы и профилометры всех типов функционируют как при подвижном, так и при неподвижном датчике.

Типовая структурная схема контактного профилометра с преобразованием сигнала изображена на рис. 2.13 и включает в себя:

1. Исследуемая поверхность детали;
2. Щуп с алмазным наконечником;
3. Измерительный преобразователь;
4. Усилитель электрического сигнала;
5. Датчик обратной связи, управления движением щупа;
6. Механизм перемещения щупа;
7. Аналогово-цифровой преобразователь;
8. Микроконтроллер;
9. Переключатель диапазонов и режимов измерения;
10. Цифровой дисплей.

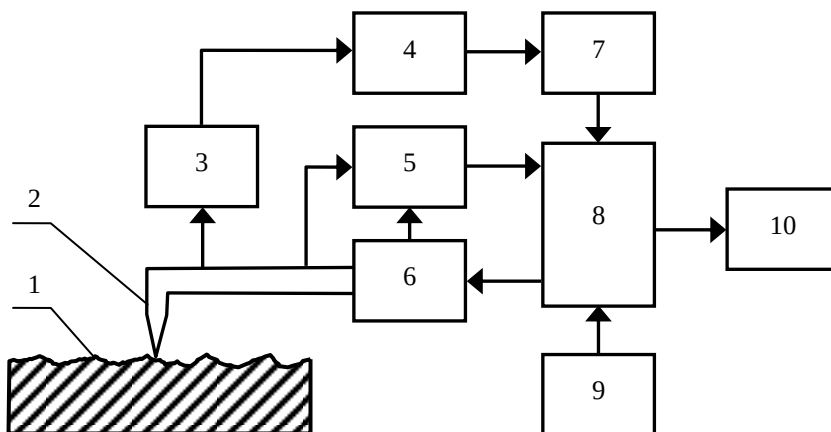


Рис. 2.13. Структурная схема контактного профилометра

Типовым представителем этого класса измерительной техники является профилометр модели Surftest SJ-210 (рис. 2.12 б), которым можно измерять шероховатость плоских поверхностей. Основные технические характеристики устройства приведены ниже:

- Измерительный диапазон шероховатости, мкм – 360; 100; 25
- Разрешение, мкм – 0,02; 0,006; 0,002
- Скорость измерения, мм/с – 0,25; 0,5; 0,75
- Измерительное усилие, мН – 0,75 при $R = 2$ мкм; 4 при $R = 5$ мкм
- Профили оценки – Ra; Rc; Ry; Rz; Rq; Rt; Rmax
- Базовая длина, мм – 0,08 мм, 0,25; 0,8; 2,5
- Количество рабочих диапазонов оценки – 3;
- Систематическая погрешность, % – 2;
- Параметр шага, мм – 0,08; 0,25; 0,8; 2,5;
- Питание – от сети переменного тока и батареи.

2.11. Атомно-силовой микроскоп

Оптические преобразователи перемещений очень широко применяются для измерения величин, которые могут быть преобразованы в перемещение. Например, они применяются в атомно-силовой микроскопии (АСМ), которая, как метод контроля поверхностей в нанометровом диапазоне возникла в 1986 году. Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации взаимодействия между сканирующим зондом и образцом. В основе атомно-силового микроскопа находится миниатюрная консольная балка – зонд (кантилевер) (см. рис. 2.14), на одном из концов которой установлен пьезоманипулятор, а на другом укреплен очень тонкий наконечник с наноразмерным остриём (алмазный или кремниевый с упрочняющим покрытием), расположенным перпендикулярно плоскости консоли. Для АСМ анализа поверхности чаще всего используют кремниевые и волфрамовые кантилеверы. Диаметр кончика острия равен $\sim 5 \dots 10$ нм [1]. В результате силового взаимодействия системы зонд-образец консоль кантилевера изгибается. В зависимости от рельефа поверхности силы межатомного взаимодействия будут варьироваться, и в результате угол изгиба консоли будет пропорционально связан с данной силой. Угол изгиба кантилевера интерпретируется как изменение Z координаты рельефа поверхности.

Первоначально был реализован контактный метод сканирования, при котором кончик зонда непрерывно находился в контакте с исследуемой поверхностью. При контактном режиме сканирования АСМ регистрирует отталкивающие силы межатомного взаимодействия. Данные силы проявляются на расстоянии $0,1 \dots 0,2$ нм. Как правило, при данном методе используется режим постоянной силы, когда система обратной связи поддерживает одинаковую величину изгиба кантилевера. При всей кажущейся простоте реализации, этот способ обладает серьезным недостатком: в нем велика вероятность повреждения поверхности образца и кончика иглы.

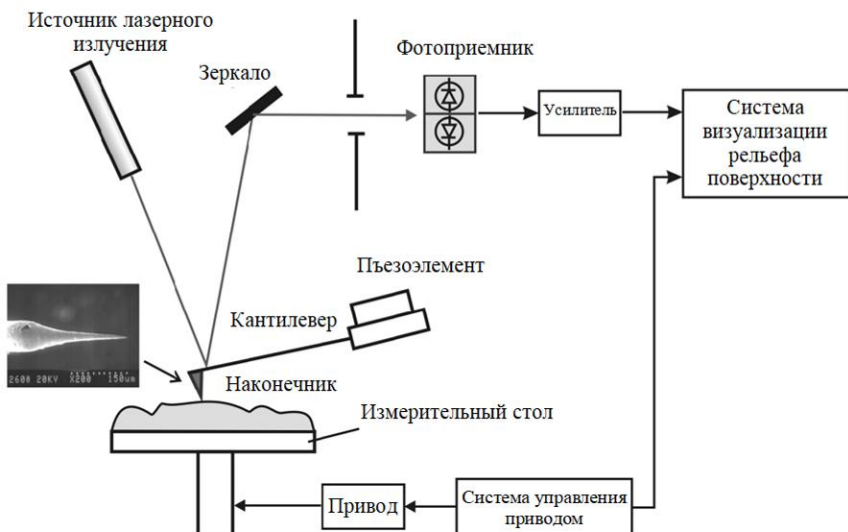


Рис. 2.14. Структурная схема атомно-силового микроскопа

В 1995 г. был предложен полуконтактный и бесконтактный режим, позволивший достичь истинно атомного разрешения и снизить нагрузку на кончик зонда и исследуемую поверхность. Этот режим основан на силах межатомного взаимодействия и реализуется путем измерения параметров собственных колебаний кантилевера (резонансной частоты, затухания, сдвига фазы между приложенной возбуждающей силой и смещением), игла которого находится достаточно далеко от поверхности (десятки – сотни ангстрем) и взаимодействует с ней посредством дальнедействующих сил Ван-дер-Ваальса.

Энергию сил Ван-дер-Ваальса взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга, аппроксимируют степенной функцией – потенциалом Леннарда-Джонса:

$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}.$$

Первое слагаемое в этом выражении описывает дальнедействующее притяжение, обусловленное, в основном, диполь-дипольным взаимодействием атомов. Второе слагаемое учитывает отталкивание атомов на малых расстояниях. Параметр r_0 – равновесное расстояние между атомами, U_0 – значение энергии в минимуме.

Природа взаимодействия зависит от расстояния между зондом и образцом. При расстояниях 0,1...0,2 нм действуют силы кулоновского отталкивания, а при расстояниях 0,4...0,7 нм действуют силы Ван-дер-Ваальса. На рисунке 2.15 изображён график зависимости сил межатомного взаимодействия от расстояния между телами. Сила Ван-дер-Ваальса имеет три составляющие. Их потенциал зависит от расстояния между молекулами одинаково – как $\frac{1}{r^6}$.

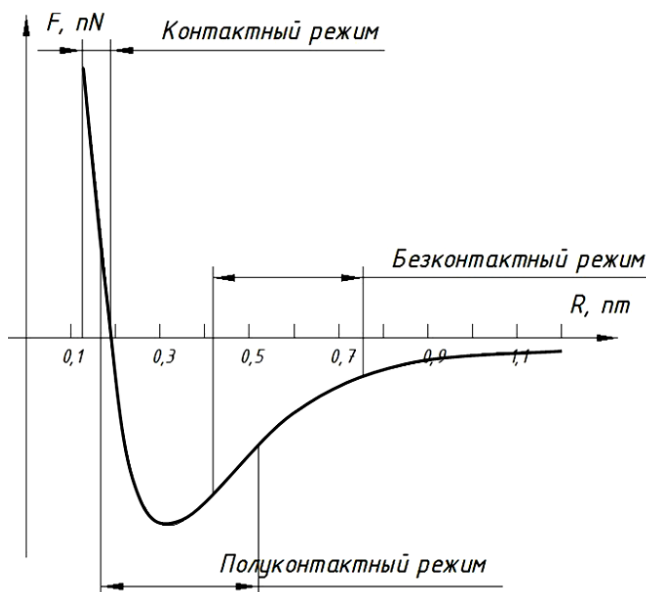


Рис. 2.15. Зависимость сил межатомного взаимодействия от расстояния

Колебания кантилевера возбуждают при помощи пьезоманипулятора. Типичные размеры кантилеверов лежат в диапазоне 10...100 мкм (длина), 3...10 мкм (ширина) и 0,1...1 мкм (толщина). Эквивалентный радиус закругления современных игл из алмаза или кремния, покрытого алмазной пленкой, имеет типичное значение 10...30 нм, что в благоприятных условиях достаточно для достижения атомного разрешения. Однако стойкость иглы пока является серьезной проблемой. Деформация кантилевера измеряется оптическим методом, а именно, по отклонению лазерного луча, падающего на его тыльную поверхность, отразившегося от неё, а затем при помощи зеркала направленного через щель на дифференциальный фото-

приемник (фотодиодную матрицу). Сигнал фотоприемника зависит, таким образом, от высоты исследуемой поверхности. Перемещая стол вместе с объектом контроля относительно зонда, регистрируют одновременно сигнал фотоприемника и сигнал управления приводом стола, получая, таким образом, зависимость высоты исследуемой поверхности от перемещения измерительного стола, т.е. профиль поверхности. Совокупность таких зависимостей позволяет получить трехмерное изображение рельефа поверхности объекта контроля.

2.12. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator

Как и в АСМ принцип работы СЗМ NanoEducator заключается в измерении зависимости между зондом в виде острой вольфрамовой иглы и поверхностью исследуемого образца от расстояния между зондом и образцом [17]. Кроме силового взаимодействия используется так же токовое (за счёт туннельного тока).

В СЗМ NanoEducator зонд закрепляется неподвижно. Образец перемещается относительно зонда при помощи сканера по трём пространственным координатам (рис. 2.16). При сканировании образец движется относительно зонда построчно в плоскости XY так, чтобы сканировать всю площадь образца с шагом Δ .

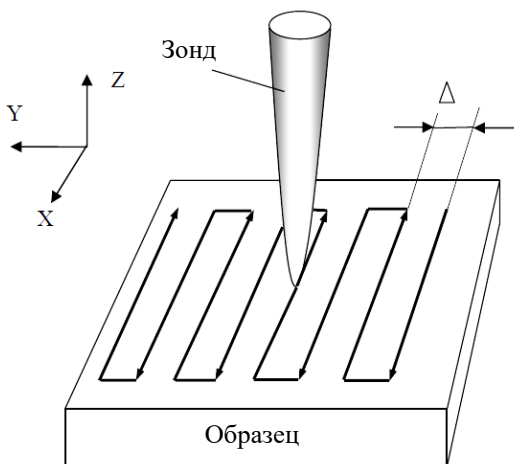


Рис. 2.16. Принцип сканирования

В процессе сканирования зонд может находиться над участками с различными физическими свойствами, в результате чего величина и ха-

рактик взаимодействия между зондом и образцом будут изменяться. Кроме этого зонд будет проходить над различными неровностями поверхности, от чего также будет зависеть взаимодействие зонда и образца. Величина локального взаимодействия поддерживается постоянной при помощи системы автоматического слежения, которая регистрирует сигнал взаимодействия и поддерживает его среднее значение на постоянном уровне. Это обеспечивается перемещением образца по Z координате. На рисунке 2.17 показана траектория движения зонда и образца.

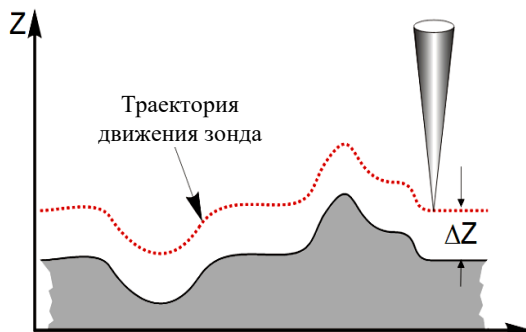


Рис. 2.17. Траектории движения зонда относительно образца

Траектория движения зонда относительно образца показаны на рис. 2.17 при сохранении постоянного значения ΔZ взаимодействия между зондом и образцом. Если зонд оказывается над областью, где взаимодействие слабее, то образец приподнимается, в обратном случае – опускается. Величина взаимодействия между зондом и образцом зависит как от расстояния между зондом и образцом ΔZ , так и от локальных характеристик поверхности. Смещение образца относительно зонда системой автоматического слежения может в результате одновременного влияния, как изменения физико-химических свойств поверхности, так и рельефа.

NanoEducator регистрирует одновременно перемещение по осям X , Y и Z . Синхронно с перемещением на экране строится изображение, где изменение локальной яркости пропорционально измеренному перемещению образца по оси Z при сканировании. Такой метод работы СЗМ называют методом постоянного взаимодействия.

Внешний вид измерительной головки сканирующего зондового микроскопа NanoEducator показан на рис. 2.18, в котором обозначены основные элементы прибора, используемые при работе.

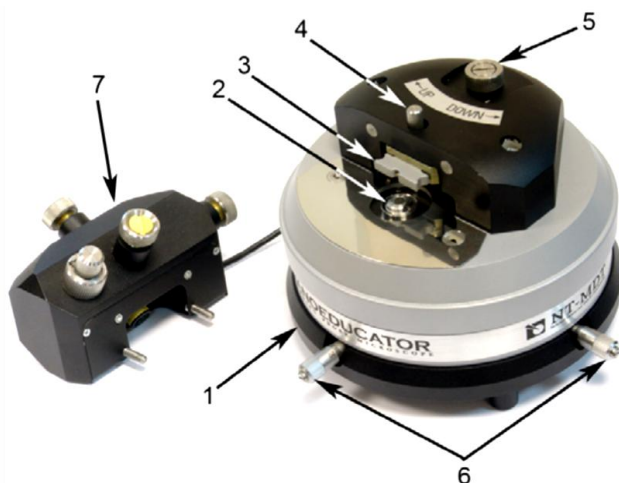


Рис. 2.18. Внешний вид измерительной головки СЗМ NanoEducator:

1 – основание; 2 – держатель образца; 3 – датчик взаимодействия;
4 – винт фиксации датчика; 5 – винт ручного подвода; 6 – винты перемещения сканера с образцом; 7 – защитная крышка с видеокамерой

На основании 1 (рис. 2.18) установлен сканер 8 с держателем образца 7 и механизм подвода 2 на основе шагового двигателя. Подвод зонда 6, закреплённого на датчике взаимодействия 4, к образцу можно также осуществлять с помощью винта ручного подвода 3. Датчик взаимодействия закрепляется при помощи винта фиксации датчика 5. Предварительный выбор места исследования на образце осуществляется с помощью винтов перемещения сканера с образцом 9, 10. Для удобства выбора места сканирования защитная крышка 7 (рис. 2.18) оснащена видеокамерой.

Зондовый датчик силового взаимодействия выполнен в виде кантилевера – пьезоэлектрической трубчатой консоли 2 длиной $l = 7$ мм, диаметром $d = 1,2$ мм и толщиной стенки $h = 0,25$ мм, которая жёстко закреплена с одного конца на неподвижном основании 1. К свободному концу трубки прикреплён игольчатый зонд 3 в виде вольфрамовой проволоки диаметром 0,1 мм 3 (рис. 2.19). Пьезоэлектрический трубчатый кантилевер используется как пьезовибратор и как датчик механических колебаний. На внутреннюю поверхность трубки нанесён проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуцилиндрических электрода.

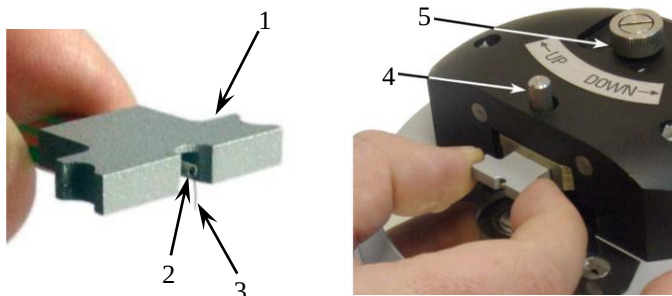


Рис. 2.19. Вид зондового датчика и установка его в NanoEducator:

- 1 – основание зондового датчика взаимодействия;
 2 – пьезоэлектрическая трубчатая консоль; 3 – игольчатый зонд;
 4 – винт фиксации датчика; 5 – винт ручного подвода

К пьезовибратору 2 (см. рис. 2.20) подводится переменное электрическое напряжение с частотой, равной резонансной частоте электромеханической системы кантилевер-зонд. Кантилевер 1 колеблется вокруг равновесного положения при максимальной амплитуде колебаний. На рисунке 2.20 показано как зонд в процессе колебаний отклоняется от равновесного положения на величину A , которая равна амплитуде его вынужденных колебаний. При этом на второй части пьезоэлемента возникает переменное электрическое напряжение, пропорциональное смещению зонда.

В результате приближения зонда к поверхности образца зонд начинает касаться образца в процессе колебаний. Степень взаимодействия зонда с поверхностью образца увеличивается, а амплитуда колебаний уменьшается на величину $\Delta A = A - A_1$. Изменение силы взаимодействия приводит к изменению величины сигнала, снимаемого с датчика системой 3.

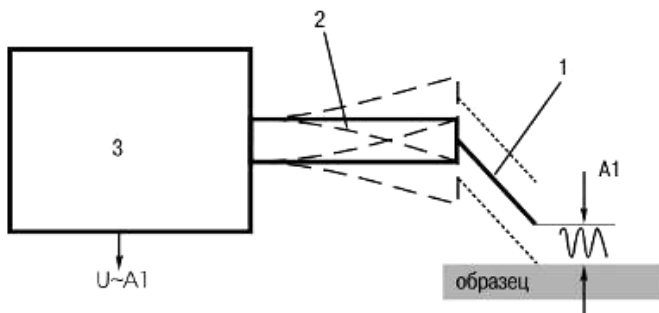


Рис. 2.20. Принцип регистрации силового взаимодействия

2.13. Формирование и обработка СЗМ-изображений

При изучении поверхностей методом сканирующей зондовой микроскопии основным результатом являются трёхмерные изображения поверхности этих объектов. Формирование СЗМ-изображений происходит на основании информации, полученной в ходе процесса сканирования образца. Информация, полученная с помощью зондового микроскопа, оцифровывается и представляется в виде двумерной матрицы целых чисел. Для того чтобы преобразовать эти числа в удобном для восприятия виде, им сопоставляется графическая интерпретация. Строка и столбец матрицы, в которых находится данное значение, становятся координатами точки. Картинка, которая получается, будет раскрашена в выбранные цвета, при этом высота поверхности (или другая физическая величина) передаётся цветом, как на географической карте. Как правило, используется палитра из 256 цветов. Для удобства восприятия точки, близкие по высоте, передаются сходными цветами.

Искомый параметр, будь то угол отклонения кантилевера или изменение его АФХ и ФЧХ, преобразуется при помощи АЦП с последующей математической обработкой в пространственную Z координату точки поверхности образца. Эти значения записываются с определённым шагом и вносятся в матрицу. Значения индексов элементов матрицы связаны с координатами на размерной сетке образца. Таким образом, получают двумерный массив с элементами, содержащими информацию о вертикальной пространственной составляющей топологии поверхности. Координаты точек поверхности вычисляются с помощью простого умножения соответствующего индекса (i или j) на величину расстояния между соседними точками (x_0, y_0), в которых производилась запись информации:

$$x = x_0 i, \quad y = y_0 j.$$

На основе этого массива методами компьютерной графики строится 3D-модель поверхности, либо 2D-карта образца с цветовым обозначением различных значений Z координаты.

При 3D-визуализации изображение поверхности $Z = f(x, y)$, соответствующей СЗМ-данным, строится в аксонометрической перспективе. В дополнение к этому используются различные способы подсвечивания пикселей, соответствующих различной высоте рельефа поверхности. Наиболее эффективным способом раскраски 3D-изображений является моделирование условий подсветки поверхности точечным источником, расположенным в некоторой точке пространства над поверхностью. Также средствами компьютерной обработки и графики реализуются масштабирование и вращение 3D СЗМ-изображений в любых плоскостях.

При 2D-визуализации каждой точке поверхности $Z = f(x, y)$ ставится в соответствие цвет. Наиболее широко используются градиентные палитры, в которых раскраска изображения производится тоном определённого цвета в соответствии с высотой точки поверхности. На рис. 2.21 приведены 2D- и 3D СЗМ-изображения компакт-диска.

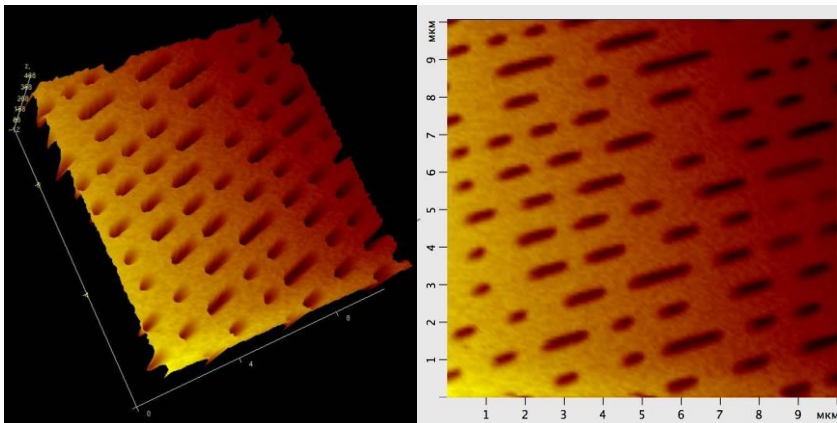


Рис. 2.21. 3D- и 2D-изображение CD-диска

2.14. Средства измерения линейных размеров и перемещений с электрическим преобразованием

Измерительными средствами с электрическим преобразованием для измерения линейных размеров называются измерительные средства, в которых преобразование измерительной информации, т.е. информации содержащей сведения об измеряемом геометрическом размере, осуществляется через преобразование в параметры электрического тока.

Обычно в электрических измерительных цепях выделяется первичный измерительный преобразователь, т. е. преобразователь, находящийся первым в измерительной (электрической) цепи, который воспринимает изменение размера и вырабатывает сигнал измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателя.

Первичный преобразователь наиболее часто выделяют в отдельный конструктивный узел, который больше известен под названием датчик или сенсор.

Помимо первичного преобразователя – датчика, электрическая цепь приборов имеет еще несколько видов преобразователей. Обычно все пре-

образователи, кроме датчика, конструктивно оформляются в отдельный узел, который часто называют электронным блоком.

Достоинства приборов с электрическим принципом действия:

- аналоговый (непрерывный) характер выдаваемой измерительной информации;

- измерительная информация может быть использована для считывания по шкале или цифровой индикации, или регистрироваться печатными устройствами или подвергаться математической обработке с помощью микропроцессорной или компьютерной техники;

- дистанционность измерения без ограничения расстояния;

- возможность разработки датчиков малых габаритов;

- универсальный источник питания – электрический ток;

- возможность иметь в одном приборе несколько диапазонов показаний и цены делений;

- возможность использования отдельно функциональных блоков, узлов и деталей, применяемых в общей электротехнике и радиотехнике.

Недостатки приборов с электрическим принципом действия:

- сложные схемы и конструкции по сравнению с механическими и пневматическими приборами, требующие для обслуживания специалистов узкого профиля;

- высокая относительная стоимость приборов;

- для некоторых видов приборов необходима высокая стабилизация напряжения питания, а необходимость для большинства приборов питания от сети ограничивает область их применения;

- недостаточно высокая надежность.

Наибольшее распространение имеют средства измерений перемещений с электроконтактными, реостатными, емкостными и индуктивными датчиками. Первый тип датчиков, электроконтактные применяется только в средствах автоматизации технологических процессов и в настоящем пособии не рассматривается.

Реостатные преобразователи перемещений

Реостатный преобразователь – это прецизионный реостат, движок которого имеет возможность перемещаться под действием измеряемой величины. Входной величиной преобразователя является угловое или линейное перемещение движка, вызванное перемещением объекта измерения. Выходной величиной является изменение его электрического сопротивления, которое преобразуется в напряжение или ток мостовой схемой.

Физической основой реостатных или омических преобразователей является тот факт, что электрическое сопротивление проводников зависит от их формы и размеров, химического состава и физического состояния

(t° , p и др.). Если проводник - цилиндрический провод, то сопротивление проводника определяется как

$$R = \rho_t \frac{l}{S}$$

где l , S – длина и площадь сечения проводника, ρ_t – удельное сопротивление, зависящее от температуры $\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t)$.

Поэтому с увеличением длины проводника l увеличивается его сопротивление. Кроме того, удельное сопротивление ρ_t , зависящее от температуры, дает возможность применения его для измерения температуры.

Устройство преобразователя показано на рис. 2.22. Он состоит из каркаса 1, на который намотан провод 2, изготовленный из материала с высоким удельным сопротивлением, и токосъемного движка 3, укрепленного на оси 4. Движок касается провода 2. Для обеспечения электрического контакта в месте касания обмотка зачищается от изоляции. В показанной конструкции контакт с подвижным движком осуществляется с помощью неподвижного токосъемного кольца 5.

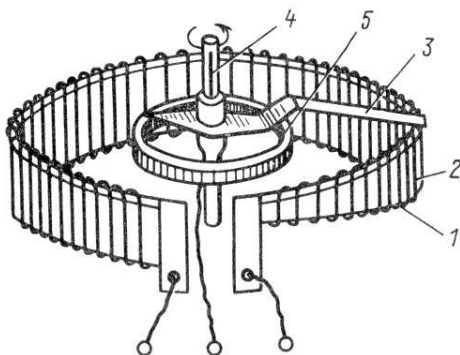


Рис. 2.22. Конструкция реостатного преобразователя

Обмотка делается обычно из провода, изготовленного из манганина, константана, фехрала. Для повышения точности и надежности она также выполняется из платино-иридиевого сплава. Для обеспечения хорошего контакта движок должен прижиматься к обмотке силой $10^{-3} \dots 10^{-4}$ Н. Сила создается благодаря упругости движка. При измерении переменных величин, при переходе движка с одного витка на другой он подскакивает, возникает пульсирующая сила, которая может нарушить контакт. По этой причине, если преобразователь служит для измерения переменных величин или работает при вибрации, то сила прижатия должна быть

увеличена. Большая сила нежелательна, поскольку при ее увеличении возрастает сила трения, препятствующая перемещению движка и увеличивающая износ обмотки и контактирующей поверхности движка. В измерительной технике требуются реостатные преобразователи, как с линейной, так и с нелинейной функцией преобразования. Одним из способов построения преобразователей с нелинейной функцией преобразования является использование каркаса с переменной высотой.

Достоинствами реостатных преобразователей:

- высокая точность 0,02...0,05%;
- высокая перегрузочная способность;
- линейная или любая заданная характеристика электрического сопротивления (выходного тока или напряжения) от величины перемещения;
- достаточно высокие уровни выходных сигналов;
- возможность питания схемы постоянным и переменным током;
- простота конструкции и дешевизна датчика.

Недостатками реостатных преобразователей:

- наличие скользящего контакта ограничивающего срок службы датчика из-за износа;
- необходимость значительных перемещений скользящего токосъемного движка при измерении;
- необходимость создания значительных усилий в измеряемом объекте для перемещения движка и как следствие возникновение гистерезиса показаний при перемене направления перемещения движка;
- возникновение дискретного характера изменения выходной величины при перескоке токосъемного движка с витка на виток.

Применение реостатных преобразователей.

Реостатные преобразователи перемещения применяются в качестве промежуточных элементов измерительных и регулирующих устройств. Поскольку многие неэлектрические измеряемые величины могут быть преобразованы в перемещение, например с помощью упругих механических элементов, поэтому реостатные преобразователи перемещения широко используются в датчиках уровня, давления, силы, ускорения, расхода и т.п.

Рассмотрим, например, устройство реостатного уровнемера, применяемого в автомобилях (рис. 2.23). Основой уровнемера топлива является погруженный в бензобак поплавков 1. Поплавок с помощью рычага 2 соединен с движком реостатного преобразователя 3, и при повышении или понижении уровня топлива перемещает движок и изменяет его сопротивление. В результате уровень топлива в баке преобразуется в электрический сигнал посредством перемещения поплавка уровнемера. Указателем уровня топлива является магнитоэлектрический логометр, образующий

вместе с реостатным преобразователем одинарный мост постоянного тока. Шкала указателя уровня отградуирована в литрах. Достоинством такой электрической схемы является независимость показаний уровня от напряжения питания, что очень актуально в автомобиле.

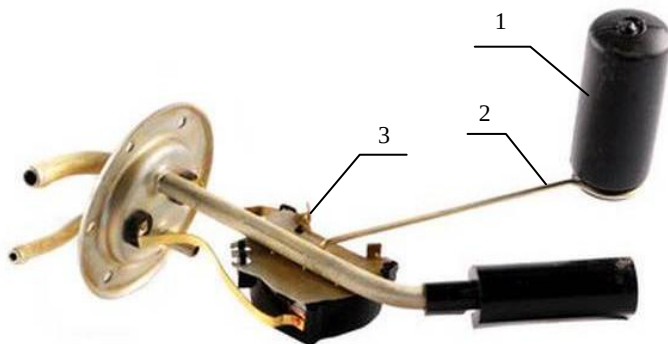


Рис. 2.23. Конструкция реостатного уровня бензобака

Еще одним частым применением реостатных преобразователей является тензометрия и измерение температуры, которые будут рассмотрены в следующих разделах этого учебного пособия.

Приборы с емкостным датчиком

Под прибором с емкостным датчиком понимается измерительное средство с электрическим преобразованием, в котором линейные (или угловые) перемещения преобразуются в изменения электрической ёмкости электрической цепи.

Электрическая ёмкость – это электрическая характеристика проводника или системы проводников.

Электрической ёмкостью одного проводника называется физическая величина C , равная отношению электрического заряда q , который сообщается проводнику, к его электрическому потенциалу φ ; т.е. $C = q/\varphi$.

Взаимная электрическая ёмкость двух проводников (в частности конденсаторов) зависит от их формы, размеров, взаимного расположения и от диэлектрической проницаемости среды.

Датчик в этих приборах в принципе является электрическим конденсатором. Электронный блок представляет собой устройство, предназначенное для измерения электрической ёмкости. Схемы этих блоков аналогичны и для емкостных, и для индуктивных датчиков и рассмотрены ниже.

Виды емкостных датчиков. Емкостным датчиком называется устройство для преобразования механических перемещений в электрический сигнал и представляющее собой плоскопараллельный или цилиндрический электрический конденсатор, у которого при изменении линейного или углового размера меняется зазор между пластинами или площадь их взаимного перекрытия.

Емкостные датчики разделяются на недифференциальные и дифференциальные.

Недифференциальным емкостным датчиком (рис. 2.24 а, б) называется датчик, состоящий из одного конденсатора, включающего подвижную и неподвижную обкладки, разделенные воздушным зазором, причем подвижная обкладка связана с измерительным наконечником, воспринимающим изменение размера.

У недифференциального датчика, работающего по изменению зазора между параллельными обкладками (рис. 2.24 а), изменение ёмкости C [пФ] связано следующей зависимостью с изменением расстояния между обкладками b , т.е. изменением измеряемого размера:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{b},$$

где ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; S – полезная площадь обкладок.

Недифференциальный датчик, работающий по изменению площади перекрытия (рис. 2.24 б), чаще всего представляет собою два коаксиальных цилиндра с зазором, значительно меньшим, чем диаметры. У этих датчиков изменение ёмкости C связано следующей зависимостью с изменением длины перекрытия l , т.е. с изменением измеряемого размера

$$C = 27,8 \cdot 10^{-3} \frac{\varepsilon l}{D - d}$$

где D и d – диаметры наружной и внутренней обкладок, мм.

Наибольшее применение имеют дифференциальные датчики, хотя они и более сложные. Эти датчики обладают более высокой чувствительностью, имеют более линейную характеристику (изменение показания прибора от изменения размера выражается прямой линией), погрешность их в меньшей мере зависит от внешней среды.

Дифференциальным емкостным датчиком называется датчик, содержащий два или более (четное число) конденсаторов, ёмкости которых изменяются с разным знаком, причем подвижная обкладка связана с измерительным наконечником, воспринимающим изменение размера (рис. 2.24 в, г, д).

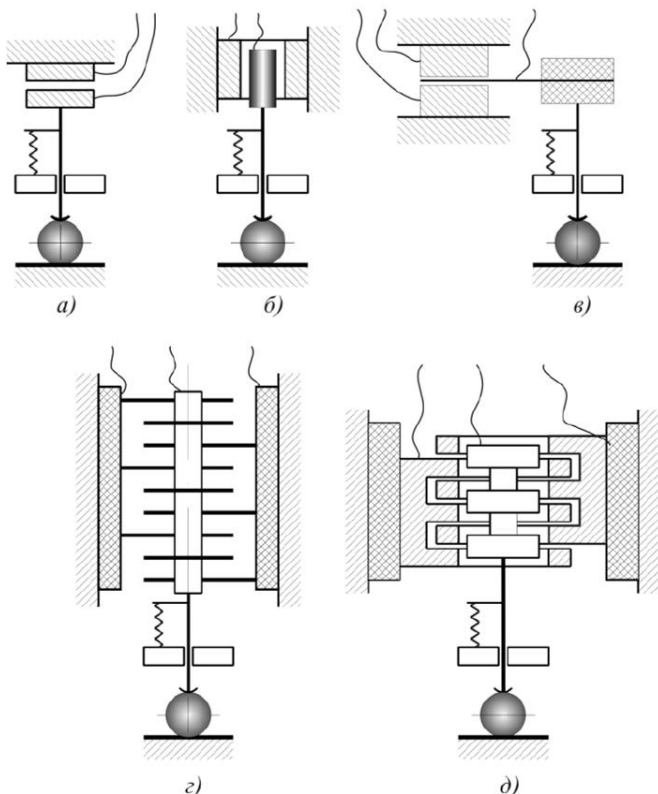


Рис. 2.24. Схемы емкостных датчиков:

а, б – недифференциальные; *в, г, д* – дифференциальные; *а, в, г* – по изменению зазора; *б, д* – по изменению площади

Дифференциальные емкостные датчики, работающие по принципу изменения зазора (рис. 2.24 *в*), имеют рабочие конденсаторы, состоящие как минимум из двух неподвижных пластин круглой или прямоугольной формы и как минимум одной подвижной пластины, расположенной между ними (т.е. как бы два конденсатора).

Датчики, работающие по принципу изменения полезной площади, также имеют две неподвижные и одну подвижную обкладку цилиндрической формы.

Для повышения полезной ёмкости датчиков их чаще всего делают состоящими из нескольких пластин с сохранением принципа действия по зазору (рис. 2.24 *г*) или из нескольких цилиндров (рис. 2.24 *д*) при работе по перекрытию площадей.

В рассмотренных дифференциальных датчиках значение измеряемого размера зависит от результирующего воздействия, связанного с увеличением электрической емкости на одном конденсаторе при одновременном уменьшении на другом. При дифференциальных схемах измерения многие влияющие факторы (например, питание сети) одновременно воздействуют на оба конденсатора и поэтому практически не оказывают влияния на соотношение их параметров, т. е. на значение измеряемого размера.

Достоинства приборов с емкостным датчиком:

- высокая линейность выходной характеристики (отклонение от линейности можно обеспечить в пределах $0,0001 \dots 0,00001 \%$);
- высокая чувствительность, т. е. может быть получена малая цена деления;
- возможность обеспечить большой диапазон показаний;
- возможность обеспечения малых измерительных усилий и даже бесконтактных измерений.

Недостатки приборов с емкостным датчиком:

- большое выходное электрическое сопротивление, что усложняет схему электронного блока и его конструкцию;
- большая чувствительность к внешним условиям и элементам электрической цепи (колебание температуры изменяет полезную площадь конденсаторов и расстояние между ними, внешние присоединительные кабели воздействуют как дополнительная ёмкость, влажность изменяет диэлектрическую проницаемость и т.д.);
- необходимость снимать сигнал с подвижного элемента (с подвижной обкладки).

Указанные недостатки привели к тому, что емкостные приборы, несмотря на то, что они появились давно, используются редко в качестве универсальных средств измерения линейных размеров.

Применение емкостных датчиков

Как правило, их применяют не как самостоятельное средство измерения, а в составе различных измерительных приспособлений и устройств. С их помощью измеряют различные геометрические размеры, линейные и угловые перемещения, преобразователи наклона (инклинометры), уровня различных жидкостей, сыпучих материалов, всевозможных вязких сред, давления, применяют в качестве датчиков контроля работы различного оборудования, в устройствах автоматики, сигнализации и т.д.

Общий вид емкостных датчиков применяемых для различных целей в промышленности показан на рис. 2.25. Как правило, в клеммной коробке датчика расположена электрическая схема преобразующая ёмкость датчика в стандартный электрический сигнал, ток или напряжение.



Рис. 2.25. Различные емкостные датчики

Ёмкостной датчик давления (см. рис. 2.26), включает деформируемый измеряемым давлением элемент (диафрагма и подвижный электрод конденсатора), в результате изменяется расстояние между диафрагмой и неподвижным электродом и соответственно ёмкость датчика. В клеммной коробке находится электронная схема, преобразующая ёмкость в стандартный токовый сигнал. Датчик устанавливается винтовой частью на контролируемом объекте и соединяется проводом с системой измерения.



Рис. 2.26. Ёмкостной датчик давления

Вид ёмкостного датчика уровня топлива, устанавливаемый в трактор МТЗ 1221, показан на рис. 2.27.



Рис. 2.27. Емкостной датчик уровня топлива

Он состоит из погружаемой в топливо части, электронной схемы, преобразующей емкость в токовый сигнал и провода с разъемом.

Емкостные приборы иногда применяют в качестве бесконтактных средств измерения, когда одной обкладкой конденсатора является поверхность измеряемой детали, например, при измерении вибрации или радиального биения вращающейся детали, когда подвижной обкладкой является цилиндрическая поверхность детали, вибрацию или биение которой измеряют.

На этом же принципе основаны емкостные толщинометры. Они работают с немагнитными, но проводящими материалами. Датчик представляет собой как бы одну обкладку конденсатора, а проводящий кузов автомобиля при измерении становится второй обкладкой. Между этими своеобразными обкладками попадает слой лакокрасочного покрытия, являющегося, по сути, диэлектриком. При изменении толщины лакокрасочного покрытия меняется и измеряемая ёмкость. Однако широкого распространения емкостной метод для измерения толщины покрытий не получил из-за высокой чувствительности к влаге, и требований минимальной кривизны контролируемой поверхности.

Приборы с индуктивным датчиком

Под **приборами с индуктивным датчиком** понимают измерительные средства с электрическим преобразованием, в которых линейные или угловые перемещения преобразуются в изменения индуктивности электрической цепи.

Электрическая схема этого вида приборов состоит из датчика, в котором механические перемещения вызывают изменение индуктивности, и

параметров элементов цепи, представляющих собою электрическую цепь измерения индуктивности.

Виды индуктивных датчиков. Индуктивным датчиком называют устройство для преобразования механических перемещений в электрический сигнал, а именно изменение индуктивности катушки с магнитопроводом и подвижным ферромагнитным сердечником (якорем), положение которого относительно магнитопровода зависит от геометрического размера объекта контроля.

Индуктивность (от латинского слова induction – наведение, побуждение) – это физическая величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи. Ток, текущий в проводящем контуре, создает в окружающем пространстве магнитное поле, причем магнитный поток Φ , пронизывающий контур, прямо пропорционален силе тока I т.е. $\Phi = LI$. Коэффициент пропорциональности L называют индуктивностью, или коэффициентом самоиндукции контура. Индуктивность зависит от размеров и формы контура, от магнитной проницаемости проводников, образующих цепь, и от окружающей среды.

Схема индуктивного датчика состоит из катушки индуктивности, т. е. проводника, свернутого в спираль, магнитопровода, состоящего из сердечника (постоянной части) и якоря, который при измерении размера смещается относительно катушки и этим самым изменяет магнитную проницаемость (сопротивление) сердечника, а, следовательно, изменяет индуктивность катушки.

В принципе, как и в емкостных датчиках, изменение индуктивности происходит либо в результате изменения зазора между подвижной частью магнитопровода (якоря) и сердечником, либо в результате изменения площади. Индуктивные датчики так же, как и емкостные, могут быть либо недифференциальными, либо дифференциальными.

Изменение индуктивности происходит от изменения параметров зазора по следующей зависимости:

$$L = \frac{w^2}{\sum_{i=1}^N \frac{l_{0i}}{\mu_0 S_{0i}} + \sum_{j=1}^k \frac{l_j}{\mu_j S_j}},$$

где w – число витков катушки; l_{0i} , S_{0i} – длина и площадь i -го воздушного участка магнитной цепи; l_j , S_j – длина и площадь j -го ферромагнитного участка магнитной цепи; μ_0 , μ_j – магнитная проницаемость соответственно воздуха и материала j -го участка магнитной цепи; N – число воздушных участков магнитной цепи; k – число ферромагнитных участков магнитной цепи.

Если якорь индуктивного датчика механически связать с объектом контроля, то изменение размера объекта или перемещение его в пространстве, приведет к изменению длины или площади немагнитных участков цепи магнитного потока, а значит и к изменению индуктивности катушки (рис. 2.28).



а)



б)

Рис. 2.28. Принцип работы индуктивного датчика (а) и общий вид (б)

Применение индуктивных датчиков

Область применения индукционных датчиков очень велика, они применяются в быту, в системах автоматики и сигнализации, в промышленности, автомобилестроении, робототехнике, медицине и т.д.

В медицинской технике индуктивные датчики используются не только как локальные датчики магнитных свойств тех или иных частей тела человека, но и в составе магниторезонансной томографии.

В автомобиле индукционные датчики применяются для определения положения коленчатого вала и являются датчиком зажигания в двигателе внутреннего сгорания.

В промышленности индукционные датчики используются в работе систем транспортеров, упаковочных аппаратов и сборочных линий, в составе всех видов станкового оборудования и запорной арматуры. Также индуктивные датчики позволяют контролировать мелкие и крупные элементы промышленной техники (зубцы шестеренок, стальные флажки, штампы), объекты производства (металлические изделия, листы металла, крышки) и т.п.

Датчики подобного типа применяются для контроля положения, как концевые датчики, для контроля размеров деталей, а так же для измерения толщины покрытия из немагнитных материалов, при условии, что под ним находится ферромагнитное вещество. На этом принципе построена работа прибора типа (рис. 2.29), который применяется для неразрушающего контроля толщины красочного покрытия на ферромагнитной поверхности. Роль якоря выполняет поверхность металла 3 и в зависимости от толщины красочного покрытия, изменяется толщина немагнитного слоя краски l_0 , а, следовательно, индуктивность катушки датчика 1.

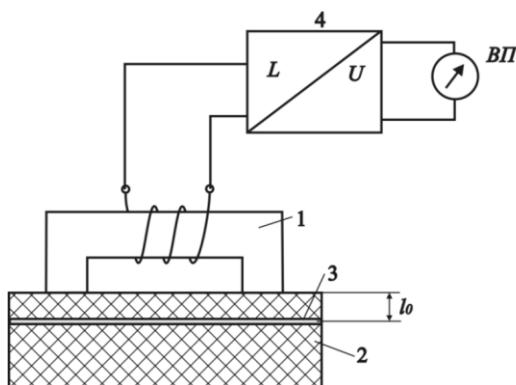


Рис. 2.29. Функциональная схема толщиномера лакокрасочного покрытия

Таким образом, показания вторичного прибор $ВП$ подключенного к преобразователю 4, зависят от толщины слоя l_0 краски.

Общий вид индуктивного толщиномера лакокрасочного покрытия показан на рис. 2.30.



Рис. 2.30. Общий вид толщиномера лакокрасочного покрытия

2.15. Вопросы для самостоятельной работы

1. Перечислите группы механических величин.
2. Охарактеризуйте основные средства измерения перемещений, линейных и угловых размеров.
3. Покажите, как пользоваться штангенциркулем и как произвести отсчет показаний по шкалам штанги и нониуса.
4. Назовите основные погрешности измерения штангенинструментом.
5. Поясните порядок пользования микрометром.
6. Назовите основные погрешности измерения микрометром.
7. Поясните порядок пользования индикатором часового типа.
8. Поясните работу оптико-механических средств измерения длины, перемещений и размеров.
9. Сущность измерения шероховатости поверхностей.
10. Поясните порядок работы атомно-силового микроскопа.
11. Охарактеризуйте средства измерения линейных размеров и перемещений с электрическим преобразованием.
12. Приведите их основные достоинства и недостатки.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЯ

3.1. Использование законов механики в измерительной технике. Второй закон Ньютона

Основными понятиями механики являются: механическое движение, материальная точка, абсолютно твердое тело, траектория движения, а параметрами механического движения, которые подлежат измерению на практике, являются пройденный путь, скорость и ускорение.

Механическое движение – изменения положения тела относительно других тел.

Материальная точка – это тело, формой и размерами которого в данной задаче можно пренебречь.

Абсолютно твёрдое тело – это тело, деформациями которого в условиях данной задачи можно пренебречь. В таком теле расстояния между отдельными точками остаются неизменными.

Траектория движения – это линия, которую точка описывает при своем движении в пространстве. Траектории бывают *прямолинейные* и *криволинейные*.

Параметры движения по характеру изменения во времени можно подразделить на параметры поступательного, вращательного и колебательного движений. Для поступательного движения характерны следующие параметры.

Пройденный путь – это расстояние, пройденное точкой или телом вдоль траектории движения (м).

Скорость – векторная физическая величина, характеризующая быстроту перемещения и направления движения материальной точки относительно выбранной системы отсчета. Определяется как перемещение или пройденный путь деленный на время (м/с). Различают *среднюю* и *мгновенную* скорость.

Вектором средней скорости называется отношение вектора перемещения ко времени, за которое это перемещение совершается

$$\vec{v}_{cp} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Вектором мгновенной скорости называется предел, к которому стремится вектор перемещения к промежутку времени при $\Delta t \rightarrow 0$

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}.$$

Он направлен по касательной к траектории в данной точке.

Но $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t}$ есть производная от $\vec{r}$ по t : $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}$.

Следовательно, мгновенная скорость равна производной от радиус-вектора движущейся точки по времени: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$. При $\Delta t \rightarrow 0$ $|\Delta \vec{r}| = \Delta S$, тогда численное значение (модуль) мгновенной скорости:

$$v = |\vec{v}| = \frac{|\Delta \vec{r}|}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}.$$

Пройденный путь за произвольный промежуток времени при неравномерном движении определяется как $S_{AB} = \int_0^{t_1} v(t) dt$.

Ускорение – векторная физическая величина, характеризующая быстроту изменения мгновенной скорости. Определяется как перемещение или пройденный путь, деленный на квадрат времени (м/с^2). По аналогии со скоростью различают *среднее и мгновенное* ускорения.

Вектором среднего ускорения называется отношение изменения скорости к промежутку времени, за которое это изменение происходит $\vec{a}_{cp} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$. Направление вектора $\vec{a}_{cp}$, совпадает с направлением вектора $\Delta \vec{v}$.

Вектором мгновенного ускорения называется предел $\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ или

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad \text{Так как } \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}, \text{ то } \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2}, \text{ и } \vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{a}_{cp}.$$

При вращательном движении параметром перемещения является центральный угол $\Delta \varphi$, называемый *угловым перемещением* точки за время Δt .

Вектор мгновенной угловой скорости равен $\vec{\omega} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\varphi}}{\Delta t} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$.

Модуль угловой мгновенной скорости численно равен $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$.

Угол поворота измеряют в радианах, угловая скорость - в рад/с.

Время, за которое точка совершает один полный оборот по окружности, называется *периодом обращения* $T = \frac{2\pi}{\omega}$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Если за время t точка совершила N полных оборотов, то период обращения равен $T = \frac{t}{N}$.

Количество оборотов, совершаемых в единицу времени, называется *частотой обращения (вращения)*, измеряется в об/с $n = \frac{N}{t} = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$.

Угловая скорость связана с частотой обращения $\omega = 2\pi n$.

Вектор среднего углового ускорения это отношение изменения вектора угловой скорости к промежутку времени Δt и равен $\vec{\varepsilon}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t}$.

Вектор мгновенного углового ускорения $\vec{\varepsilon} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{\omega}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{\varepsilon}_{\text{ср}} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}$.

Вектор углового ускорения характеризует быстроту изменения угловой скорости и измеряется в рад/с².

Учитывая, что $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, модуль углового мгновенного ускорения определяется как вторая производная углового перемещения $\varepsilon = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$.

В соответствие со вторым законом Ньютона тело под действием силы приобретает ускорение, *пропорциональное* этой силе.

Ускорение, приобретаемое материальной точкой в инерциальной системе отсчёта, прямо пропорционально действующей на неё силе $\vec{F}$ и обратно пропорционально массе этого тела m ; по направлению ускорение совпадает с вектором силы $\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$ или $\vec{F} = m\vec{a}$.

Учитывая, что $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, второй закон Ньютона можно записать в форме $\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$.

При вращательном движении *угловое ускорение твёрдого тела, вращающегося вокруг неподвижной оси прямо пропорционально моменту всех внешних сил и обратно пропорционально моменту инерции тела*

$$\varepsilon = \frac{M}{I},$$

где M – момент силы, I – момент инерции твердого тела.

3.2. Классификация средств измерения линейной и угловой скорости. Методы и средства измерения линейных скоростей и скоростей вращения

Средства измерения линейных скоростей, называются *измерителями скорости*; средства измерения угловых скоростей или частоты вращения, называются *тахометрами*, а средства измерения ускорений, называются *акселерометрами*.

Большой класс средств измерений применяется для измерения параметров колебательного движения (вибраций). Если измеряются параметры вибраций машин, устройств, сооружений, то соответствующие средства называются *виброметрами*. Приборы, применяемые для измерения параметров движения земной поверхности, называются *сейсмографами*.

Наиболее распространенными методами измерения линейных скоростей v движущихся твердых тел являются механические методы, включая аэрометрический, компенсационный, термодинамический, турбинный, центробежный, корреляционный, а также магнитоиндукционный, электромагнитный, доплеровский, инерциальный и другие методы.

3.3. Механические, магнитоиндукционные, электрические и стробоскопические тахометры.

Тахогенераторы постоянного и переменного тока

Аэрометрический метод (рис. 3.1 а) основан на измерении скоростного (динамического) напора p_n , функционально связанного со скоростью тела, движущегося в воздушной среде. Скоростной напор определяется манометрической коробкой 3 путем сравнения статического давления $p_{ст}$, образуемого при движении воздушной среды в приемнике статического давления 1 и приемнике полного давления (скоростного напора) 6. Результат сравнения показывается стрелкой 4 на отсчетном устройстве. Средства измерения, построенные на аэрометрическом методе, позволяют измерять скорость с погрешностью, не превышающей 2...3 %. Применяются такие приборы в основном в авиации.

Компенсационный метод (рис. 3.1 б) основан на автоматическом уравнивании полного давления p_n и давления p_k , развиваемого 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 , давления p_n и p_k уравниваются.

Замыкание цепи двигателя 3, приводящего во вращение компрессор, происходит тогда, когда давление p_n больше давления 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 .

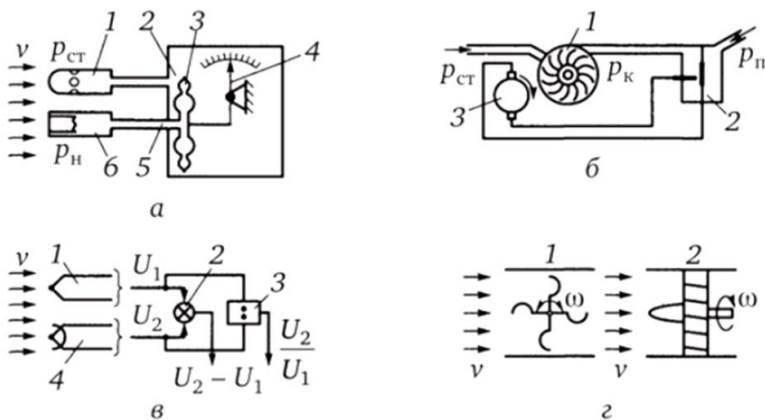


Рис. 3.1. Методы измерения линейных скоростей

Термодинамический метод (рис. 3.1 в) основан на измерении температуры заторможенного потока воздушной среды с помощью открытой термопары 1 и экранированной термопары 4 (либо других преобразователей температуры). Разность напряжений U_1 и U_2 этих термопар улавливается сумматором 2 и делителем 3. Для реализации этого метода необходимы малоинерционные измерители температуры. Погрешности средств измерений скоростей по этому методу обусловлены непостоянством параметров преобразователей температуры (1 и 4).

В *турбинном методе* (рис. 3.1 г) используется кинетическая энергия воздушного или водного потока для вращения тангенциальной 1 или аксиальной 2 турбинки. Частота вращения турбинки ω будет пропорциональна скорости движения.

Средства измерений в виде аксиальной турбинки нашли широкое применение при измерении скорости морских судов.

При измерении скоростей вращения наиболее широкое распространение в технике получили центробежные, магнитоиндукционные, электрические (постоянного и переменного тока), индукционные и стробоскопические методы измерения скоростей вращения.

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

Магнитоиндукционный метод основан на зависимости наводимых в металлическом теле вихревых токов от частоты вращения. Тахометры, построенные на этом методе, выполняются в двух вариантах: с цилиндриче-

ским чувствительным элементом (рис. 3.2 а) и дисковым чувствительным элементом (рис. 3.2 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 измерять, 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 шунт 3. Применяют такие приборы в спидометрах автомобилей.

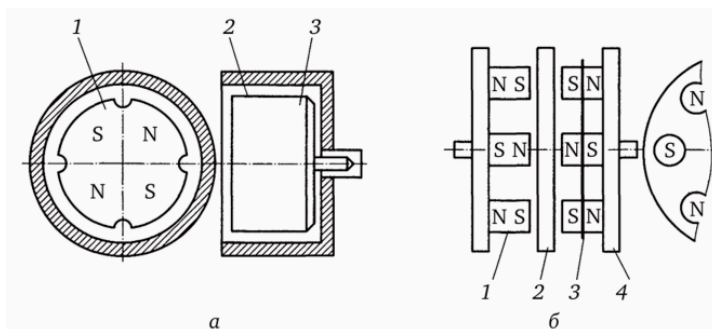


Рис. 3.2. Магнитоиндукционные тахометры:

а – с полым ротором; б – с диском

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

Электрические тахометры постоянного тока (рис. 3.3) 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. 3.3 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. Достоинство такого тахогенератора – отсутствие коллектора и щеток.

Основными элементами тахогенератора с *неограниченным углом поворота* (рис. 3.3 б) являются постоянный магнит 1 с соответствующими

магнитопроводами, обмотка якоря 2 и коллектор с щетками 3. Снимаемое с коллектора напряжение постоянного тока измеряется гальванометром.

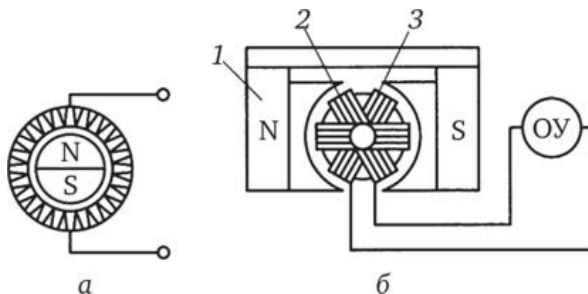


Рис 3.3. Схемы электрических тахометров постоянного тока:

а – тахогенератора с $\varphi < \varphi_0$; *б* – тахогенератора постоянного тока:

1 – постоянный магнит; 2 – обмотка якоря; 3 – коллектор с щетками;

ОУ – отсчетное устройство

В тахометрах переменного тока тахогенератор состоит из вращающегося постоянного магнита и статорной обмотки. Измерение угловой скорости сводится к измерению частоты переменного тока, равной частоте вращения, или к измерению амплитуды напряжения. Первый способ более предпочтителен, так как частота вращения равна частоте переменного тока.

Индукционные тахометры (рис. 3.4) представляют собой электрическую машину асинхронного типа, состоящую из внешнего и внутреннего магнитопроводов, в зазоре между которыми располагаются статорная обмотка, состоящая из обмотки возбуждения и сигнальной обмотки, и алюминиевый тонкостенный ротор, выполненный в виде цилиндра. Оси обмоток (катушек) возбуждения и сигнальной взаимно перпендикулярны.

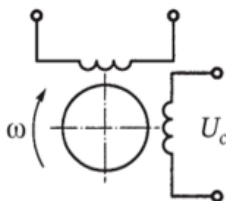


Рис. 3.4. Схема индукционного тахометра

К обмотке возбуждения подводится переменное напряжение частотой 400 Гц, а с сигнальной обмотки снимается напряжение U_c той же час-

тоты, амплитуда которого пропорциональна угловой скорости вращения полого ротора.

Стробоскопический метод измерения угловой скорости основан на свойстве глаза сохранять видимое изображение на десятые доли секунды после его исчезновения. Средства измерения, построенные по этому принципу, являются наиболее точными из рассмотренных ранее. Они нашли применение в лабораторных исследованиях, а также при создании образцовых средств измерений.

Принцип реализации эффекта поясняет рис. 3.5. Если отметку 4 на вращающемся валу 1 освещать вспышками света от источника 2, то при совпадении числа вспышек с частотой вращения отметка будет казаться неподвижной. Если эта разность будет отлична от нуля, то отметка начнет вращаться со скоростью в ту или иную сторону (в зависимости от знака разности частоты вращения и числа вспышек). Поскольку глаз оператора 3 замечает очень медленное движение отметки, то, подбирая частоту вспышки посредством устройства регулирования вспышки (УРВ), можно остановить отметку и определить частоту вращения вала.

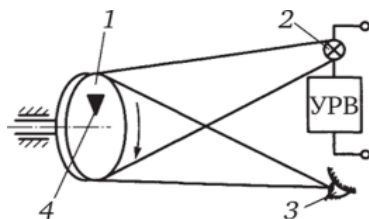


Рис. 3.5. Схема стробоскопического тахометра:

1 – вращающийся вал; 2 – источник света; 3 – глаз оператора; 4 – отметка;
УРВ – устройство регулирования вспышки

Точность измерения определяется точностью воспроизведения и измерения частоты вспышек, точностью регистрации моментов остановки стробоскопической картины.

3.4. Радары, основанные на использовании эффекта Доплера

Радар является специализированным прибором измерения скорости основанный на эффекте Доплера. Эффект Доплера заключается в изменении частоты или длины волны электромагнитного излучения при движении объекта наблюдения по отношению к наблюдателю.

Принцип действия радара заключается в следующем. Радар излучает радиоволну известной частоты. Длина волны, как правило, лежит в сантиметровом диапазоне и представляет собой импульсный сигнал. Когда вол-

на встречается с движущимся автомобилем, сигнал отражается и возвращается к радару с измененной частотой. При движении объекта измерения в направлении на измерителя частота отраженного сигнала повышается. При удалении объекта от измерителя частота отраженного сигнала понижается. Частота отраженного сигнала определяется по формуле:

$$f = f_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c} \cos \theta},$$

где $f_0 = \frac{c}{\lambda}$ – частота волны исходного сигнала излучаемого радаром, f – частота сигнала отраженного от объекта, v – скорость объекта измерения относительно радара (приемника), c – скорость света, θ – угол между направлением на источник и вектором скорости в системе отсчёта приёмника.

Прибор вычисляет разность между частотами исходного и отраженного сигнала, и на основе этого значения определяется скорость движения автомобиля. Учитывая, что при скоростях движения наземного транспорта изменение частоты незначительное, поэтому чаще измеряется сдвиг фазы отраженного сигнала по отношению к исходному сигналу.

Сдвиг фазы в этом случае определяется формулой

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi v \Delta t}{\lambda},$$

где λ – длина волны сигнала радара, v – скорость автомобиля, Δt – время между двумя импульсами, φ – фаза волны импульсного сигнала.

Отсюда скорость движущегося объекта определяется по формуле

$$v = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi \Delta t}.$$

Доплеровские радары могут применяться в самых разных областях: для определения скорости летательных аппаратов, кораблей, автомобилей, гидрометеоров (например, облаков), морских и речных течений, а также других объектов. Переносные радарные приборы для измерения скорости используются службами дорожной безопасности для выявления нарушений скорости движения автомобилей.

Полицейский радар представляет собой одновременно и источник сигнала, и приемник, который регистрирует частоту отраженного радиочастотного излучения. Далее следует обработка сигналов, вычисление с

помощью процессора по соответствующему алгоритму искомой скорости и выдача результата на дисплей. Общий вид различных типов полицейских радаров и структурная схема представлены на рис. 3.6 и 3.7.



Рис. 3.6. Общий вид радаров ГИБДД

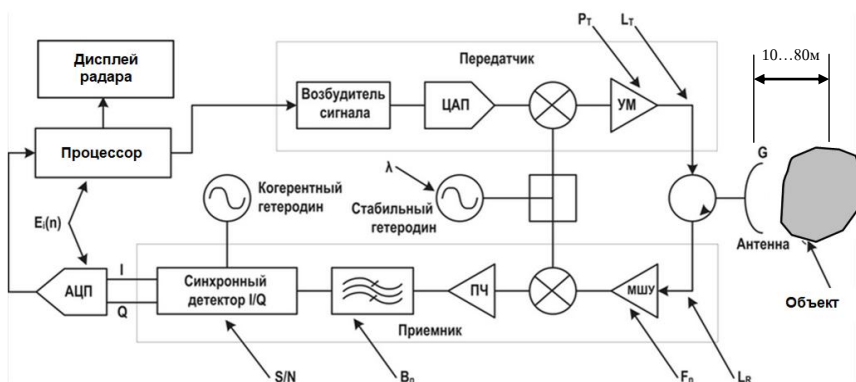


Рис. 3.7. Структурная схема радара

Большинство современных радаров работают в диапазоне К, а значит, создают излучение на частоте примерно 24,15 ГГц. Отраженный от

движущегося предмета сигнал имеет другую частоту. И для определения скорости автомобиля разница уменьшается вдвое, а относительная радиальная скорость рассчитывается по формулам, приведенным выше. В таблице 3.1 приведены диапазоны частот различных типов радаров.

3.1 Типы и диапазоны радаров ГИБДД

Диапазон	Частота	Пример модели
X	10,525 GHz ±100 МГц	Барьер-2М. Сокол-М.
KU	13,45 GHz ±125 МГц	В нескольких странах Европы.
K	24,125 GHz ±175 МГц	Арена. Беркут. Бинар. Визир. Искра-1. Кордон. Кречет. Крис-С/-П. Места 2200. Радис. Рапира-1. Робот. Стрелка-01-СТ/-01-СТР/-01-СТМ.
K	24,16 GHz ±100 МГц	ПКС-4.
KA	34,3 GHz ±1300 МГц	В нескольких странах Европы.
KA	34,7 GHz ±1300 МГц	В нескольких странах Европы.
LASER	800-1100 nm	Амата. ЛИСД-2М/-2Ф.

Погрешность радаров СТРЕЛКА как заявляют производители не более чем в 1 км/ч, а погрешность КРИС-П составляет 1 км/ч. Радары более ранних выпусков могут иметь погрешность до 2 км/ч.

Таким образом, получается, что при попадании в поле зрения радара радиальная скорость автомобиля в большинстве случаев будет определена с точностью до 2 км/ч. При этом радар не будет учитывать ту составляющую скорости, которая направлена перпендикулярно. То есть при движении в повороте, а также по холмистой местности регистрируемая скорость автомобиля будет тем ниже, чем больше составляющая направления движения, перпендикулярная к линии, соединяющей радар и автомобиль.

Если же движение происходит по прямой, без перепадов высот и поворотов, можно считать, что радар регистрирует скорость и в худшем случае еще увеличивает показание на +2 или +5 км/ч.

При работе радара на его показания оказывают влияние различные факторы.

Помехи в работе радара возникают из-за того, что радиолуч отражается еще и от поверхности земли, зданий и растительности. Помехи создают область уязвимости в радаре во временной области амплитуды импульсов. Это также существует во всем объеме движущегося воздуха, связанного с погодным явлением.

3.5. Средства измерения ускорений. Акселерометры

Ускорения, измеряемые на практике, могут быть линейными и угловыми. Средства измерения ускорений называются *акселерометрами*.

Для измерения линейных ускорений применяются инерциальный метод, метод дифференцирования скорости и метод двухкратного дифференцирования расстояния до неподвижной базы.

Инерциальный метод основан на измерении силы, развиваемой инерционной массой при ее движении с ускорением (рис. 3.8 а). Принцип действия средств измерений, реализующий инерциальный метод, заключается в следующем. 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 усиление F , уравнивающее инерционную силу ma_x .

Методы одно- или двухкратного дифференцирования сводятся соответственно к дифференцированию измеренных скоростей или расстояния до неподвижной базы.

Основными элементами акселерометров (рис. 3.8 б...г) 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. Применяют также электромагнитные и криогенные подвесы.

В качестве преобразователей сигналов применяются емкостные, индукционные, фотоэлектрические, струнные и др. Основные требования, предъявляемые к ним: большая разрешающая способность, линейная зависимость выхода от входа, отсутствие реакции преобразователя на чувствительный элемент.

В *маятниковых акселерометрах* (см. рис. 3.8 б) чувствительный элемент 4 находится в жидкости 2, заключенной в корпусе 3. Сигнал с чувствительного элемента снимается преобразователем 5 и подается на усилитель У. С выхода усилителя сигнал поступает на моментный двигатель, который развивает момент, зависящий от ускорения.

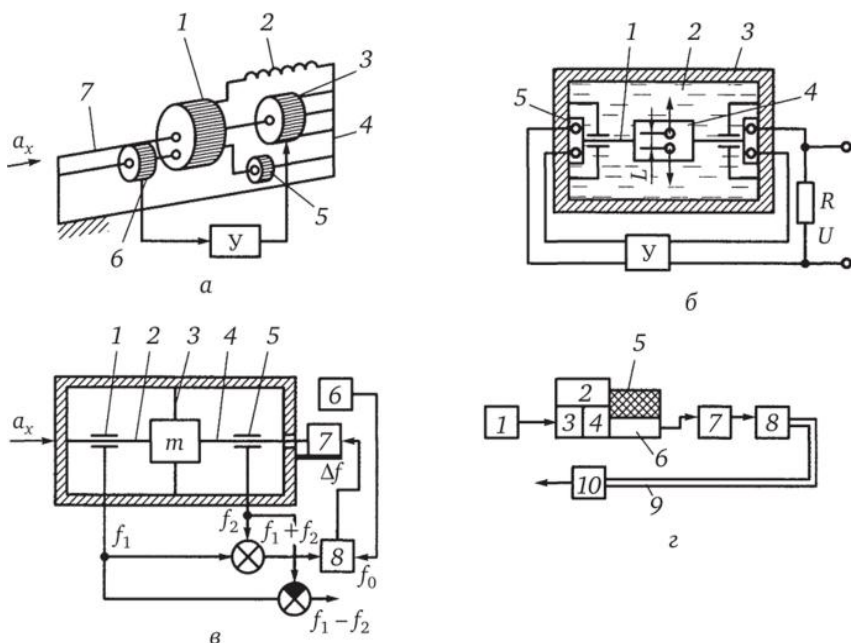


Рис. 3.8. Средства измерения ускорений:

а – схема акселерометра:

1 – инерционная масса; 2 – пружина; 3 – электромагнит; 4 – корпус прибора;
5 – демпфер; 6 – преобразователь; 7 – ось; У – усилитель;

б – схема маятникового акселерометра:

1 – подвеска; 2 – жидкость; 3 – корпус; 4 – чувствительный элемент;
5 – преобразователь;

в – схема струнного акселерометра:

1,5 – струнный преобразователь; 2,4 – 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; 3,8 – линза; 4 – поляризатор; 5 – фотоупругий материал; 6 – четвертьволновая пластина; 7 – анализатор; 9 – волоконный светопровод; 10 – приемник излучения (фотодиод)

В акселерометрах со струнными преобразователями 1 и 5 (рис. 3.8 в) смещение массы m меняет упругие свойства струн 2 и 4, натянутых в направлении оси чувствительности. Упругий подвес 3 исключает движение массы m в поперечном направлении. Сумма частот колебаний струн 2 и 4 поддерживается постоянной посредством регулирующего устройства 8, для чего она сравнивается с эталонной частотой, вырабатываемой генератором 6. Разность частот используется для управления механизмом 7

натяжения струн. Струнные акселерометры находят применение в инерциальных системах управления.

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. 3.8 *г* источник света 1 (например, полупроводниковый лазер), 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. Преобразуя полученный сигнал с помощью четвертьволновой пластины 6, анализатора 7 и линзы 8, он поступает по волоконному светопроводу 9 на приемник излучения (фотодиод) 10. В результате определяется величина ускорения с достаточно высокой точностью.

3.6. Методы и средства измерения параметров вибраций

Механическое колебание или вибрация это циклическое изменение во времени механической величины в заданных пределах.

В колебательном процессе различают:

- детерминированные процессы, подчиняющиеся определенному математическому закону, которые повторяются или могут повторяться во времени;
- стохастические процессы – беспорядочные процессы, которые не описываются математической функцией и определяются случайной последовательностью разных причин.

Целью измерения механических колебаний является получение информации о колебательном процессе. В основном эта задача решается путем определения амплитуды, частоты или фазы. При стохастических процессах можно лишь путем сортировки мгновенных значений по различным критериям ограничиться статистическими оценками. В простейшем случае это сводится к измерению уровня колебаний.

На рис. 3.9 схематически показаны колебательные системы. Имеется возможность измерения перемещений S на свободном конце вибратора с пружинной подвеской (*а*) или вибратора с изгибным колебанием (*б*), или также силы в опорах обоих этих вибраторов. В зависимости от обстоятельств измеряют либо перемещение S , либо силу F . Зная значения массы m и упругости пружины колебательной системы, можно математически перейти от одной из этих величин к другой.

В то время как измерительные преобразователи силы вводятся непосредственно в цепь передачи силы, в измерительных преобразователях пе-

ремещений весь преобразователь или, по меньшей мере, его подвижный элемент должен быть прикреплен к объекту измерения. В обоих случаях измерительный преобразователь оказывает большее или меньшее обратное воздействие на объект измерения. Выбором соответствующих методов измерений и измерительных преобразователей можно создать условия, исключающие недопустимые искажения колебательного процесса.

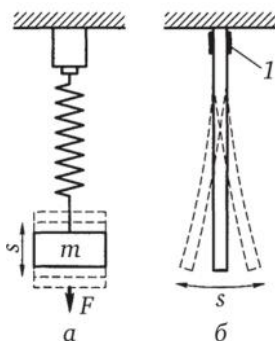


Рис. 3.9. Измерение механических колебаний при помощи преобразователей перемещения и силы:

a – вибратор с пружинной подвеской;

б – вибратор с изгибными колебаниями; *1* – тензорезистор

По методу преобразования колебаний в электрические величины приборы измерения вибраций подразделяются на резистивные и индуктивные (пассивные), а также пьезоэлектрические (активные). Последние пригодны для колебаний высокой частоты и ударных ускорений.

Для измерения относительных виброперемещений в основном применяют индуктивные преобразователи перемещения с сердечниками, не имеющими направляющих и жестко соединенными с объектом измерения (рис. 3.10). При этом сердечник крепится к подвижному объекту измерения, а корпус преобразователя – к неподвижной опоре. Такие индуктивные измерительные преобразователи серийно выпускаются для измерения перемещений от $\pm 0,1$ до ± 300 мм.

Индуктивные измерительные преобразователи абсолютных виброперемещений в конструктивном отношении принципиально соответствуют схеме, показанной на рис. 3.10. Виброперемещения между корпусом и сейсмической массой измеряются при помощи дифференциальных индуктивных или трансформаторных преобразователей. Преобразователи для абсолютных виброперемещений выпускаются с собственной частотой от 0,7 до 5,0 Гц; максимальные измеряемые виброамплитуды ± 25 мм. Несмотря на такую большую виброамплитуду эти приборы можно также ис-

пользовать для измерения параметров колебаний в несколько микрометров.

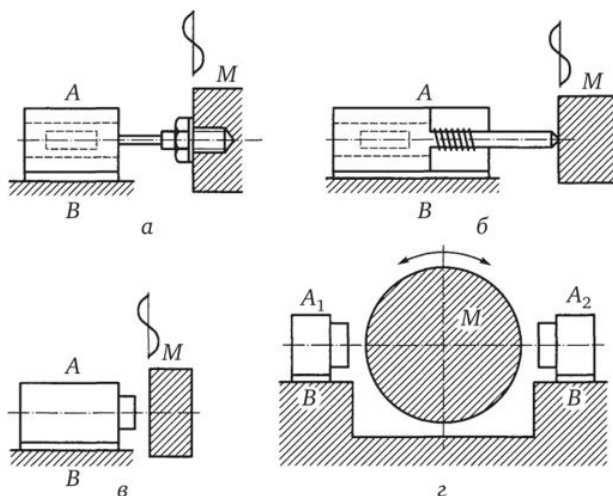


Рис. 3.10. Измерение параметров механических колебаний индуктивными преобразователями перемещений:

- a* – жестко соединенным с объектом посредством втяжного якоря;
- б* – соединенным с объектом посредством шупа с силовым замыканием;
- в* – бесконтактно связанным с движущимся объектом измерения;
- г* – бесконтактно связанным с движущимся объектом измерения, с дифференциальным соединением двух преобразователей для измерения горизонтальной вибрации вращающегося вала;
- A* – преобразователь измеряемой величины; *B* – неподвижная опора;
- M* – движущийся объект измерения

На рис. 3.11 показана схема измерительного преобразователя абсолютных виброперемещений, рассчитанного на большие перемещения в вертикальном направлении. Свободная, или сейсмическая, масса в виде толстой медной пластины расположена на свободном конце измерительного маятника, закрепленного шарнирно практически без трения с помощью двух плоских пружин. Эта медная пластина перемещается в воздушном зазоре постоянного магнита и служит таким образом одновременно для демпфирования системы. Колебания маятника относительно корпуса измеряются преобразователем перемещений. Пружина создает противодействующую силу и служит для компенсации ускорения силы тяжести.

Приборы для контроля турбин и машин применяются для определения параметров их вибраций в процессе эксплуатации. В основном они измеряют виброскорость в местах, которые существенны с точки зрения

обеспечения бесперебойности работы, и могут в случае чрезмерных вибраций подать сигнал тревоги. В таких контрольных установках могут наряду с преобразователями виброскорости применяться также и преобразователи виброперемещений и виброускорений.

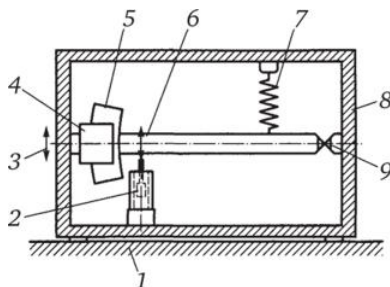


Рис. 3.11. Схема измерительного преобразователя абсолютных виброперемещений, рассчитанного на большие перемещения в вертикальном направлении:

- 1 – объект измерения; 2 – преобразователь перемещений;
 3 – виброперемещение корпуса; 4 – демпфирующий магнит;
 5 – сейсмическая масса (демпфирующая пластина); 6 – виброперемещение сейсмической массы в центре тяжести маятника; 7 – пружина для компенсации силы земного притяжения; 8 – корпус; 9 – пружинный шарнир

В *резистивных измерительных преобразователях* виброперемещений преобразование силы, действующей при колебаниях на сейсмическую массу, в электрическую величину осуществляется металлическими или полупроводниковыми тензорезисторами или струнными тензометрами, включенными в схему двухплечего или четырехплечего моста. Так как собственная частота акселерометров с резистивными преобразователями из-за необходимой чувствительности измерений не может быть выбрана произвольно большой, то в этих преобразовательных системах предусматривается жидкостное демпфирование. Этим достигается широкий диапазон полезных частот от 0 до 60 % от собственной частоты преобразователя. Однако из-за температурной зависимости вязкости силиконового масла, обычно применяемого для демпфирования, преобразователи с жидкостным демпфированием могут использоваться только в ограниченном диапазоне температур — примерно от -20 до $+60$ °C. Очень высокой чувствительностью отличаются пьезорезистивные преобразователи. Так как эти преобразователи могут иметь высокую собственную частоту, они иногда поставляются также без жидкостного демпфирования.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи виброперемещений являются активными преобразователями, которые, как и электродинамические преобразователи, создают измерительное напряжение без

подачи на них напряжения от постороннего источника. Принцип работы вибропреобразователя основан на явлении прямого пьезоэффекта.

Из-за высокой частоты собственных колебаний пьезоэлектрические виброперемещения пригодны для высокочастотных процессов.

Особой областью применения пьезоэлектрических преобразователей ускорения и виброперемещения является измерение импульсных процессов, например, при испытании оружия и при экспериментальных столкновениях автомобилей. Из-за малых размеров и малой массы они работают практически без обратного воздействия и поэтому пригодны также для объектов измерения малого размера.

Преобразователи ускорения и виброперемещения с пьезоэлектрическим материалом из кварца можно применять для измерения при температуре до 400°C и, следовательно, устанавливать их на двигателях внутреннего сгорания.

Пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи марки ДН предназначены для измерения параметров механических колебаний и преобразования их в электрические сигналы, пропорциональные ускорению колеблющегося объекта. При воздействии механических колебаний на основание вибропреобразователя пьезоэлементы вибропреобразователя подвергаются деформации сжатия, в результате чего на гранях пьезоэлементов возникают электрические заряды пропорциональные действующему ускорению.

Общий вид преобразователей ДН-3, ДН-4 представлен на рис. 3.12.

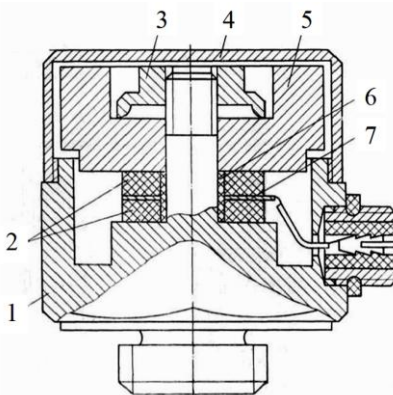


Рис. 3.12. Общий вид преобразователей ДН-3, ДН-4:

1 – основание, 2 – пьезоэлементы, 3 – гайка пружинная, 4 – крышка,
5 – масса инерционная, 6 – втулка, 7 – контакт

Вибропреобразователи ДН-3, ДН-4 состоят из основания 1, пьезоэлементов 2, массы инерционной 5, втулки 6, контакта 7 для снятия электрического потенциала. Статическая нагрузка на пьезоэлементы осуществляется гайкой 3, которая также регулирует собственную частоту колебания инерционной массы вибропреобразователя. Сверху вибропреобразователь закрыт крышкой 4.

Вибропреобразователи марки ДН имеют разную спектральную чувствительность. Так датчик ДН-3 используется на частоте от 1000 до 4000 Гц, ДН-4 – от 1000 до 12500 Гц, ДН-5 – от 200 до 500 Гц.

Способы установки вибропреобразователей на объекте представлены на рис. 3.13. Вибропреобразователь может быть закреплён на объекте с помощью шпильки вкрученной в тело колеблющегося объекта (рис. 3.13 а), приклеено воском к поверхности (так может быть установлен преобразователь ДН-5) (рис. 3.13 б). В случае, когда практически невозможно осуществить прочное крепление вибропреобразователя на объекте, измерения производят с помощью щупа удерживаемого вручную, прижав датчик к поверхности колеблющегося объекта (рис. 3.13 в).

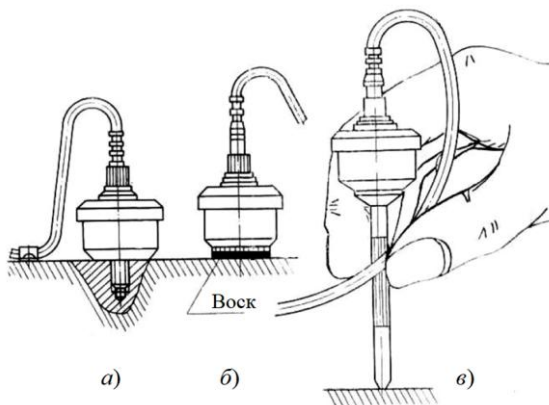


Рис. 3.13. Способы установки вибропреобразователей на объекте:
 а) установка с помощью шпильки; б) установка с помощью заглушки и воска;
 в) установка щупа вручную

3.7. Вопросы для самостоятельной работы

1. Перечислите и дайте определения основных понятий механики? Запишите основные формулы кинематики и динамики.
2. Приведите классификацию средств измерения линейной и угловой скорости.
3. Поясните методы и средства измерения линейных скоростей и скоростей вращения.
4. Поясните сущность механических, магнитоиндукционных тахометров.
5. Поясните сущность электрических и стробоскопических тахометров.
6. В чем заключается эффект Доплера? Приведите формулы.
7. Поясните структуру построения радаров.
8. Поясните методы и средства измерения ускорений.
9. Что такое акселерометры.
10. Поясните методы и средства предназначенные для измерения параметров механических вибраций.
11. Поясните устройство измерения параметров механических колебаний индуктивными преобразователями перемещений.
12. Поясните устройство вибропреобразователей.
13. Поясните сущность резистивных и пьезоэлектрических вибропреобразователей.

4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ, ВЕСА И ДАВЛЕНИЯ

4.1. Использование законов механики при измерении силы и веса

Сила – это векторная величина, характеризующая механическое воздействие на материальное тело со стороны других тел или полей. Сила характеризуется числовым значением или модулем, точкой приложения и направлением. Точка приложения силы и её направление определяют линию действия силы.

Существуют различные виды сил: гравитационные, электромагнитные, реактивные, ядерные, слабого взаимодействия, сила инерции, сила трения и другие. С малыми силами имеют дело при научных исследованиях, при испытании точных датчиков силы в системах управления и др. Силы от 1 Н до 1 МН характерны для испытательной техники и при определении усилий в транспортных средствах, прокатных станках и другое.

Погрешности измерений силы и моментов при технических измерениях составляют 1...2%. К измерению силы сводится измерение таких физических величин, как давление, ускорение, масса, погрешность измерения которых во многих случаях не должна превышать 0,001%.

Наиболее характерным проявлением силы является ее способность сообщать телу ускорение и деформировать взаимодействующие тела.

Связь между силой F , ускорением a и массой m определяется вторым законом Ньютона:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Выражение второго закона Ньютона редко используется для измерения силы; наоборот, измерением силы определяется ускорение тела.

Силы упругости – возникают при *деформации* тела, т.е. при изменении его формы или объема, обусловленном действием *внешних* сил. Если после прекращения действия внешней силы, вызвавшей деформацию, тело *полностью* восстанавливает свою первоначальную форму и размеры, оно называется *упругим*. Упругими называются и деформации, возникающие в таком теле. Для упругих деформаций справедлив *закон Гука*: упругая сила, возникающая при деформации, пропорциональна величине деформации:

$$F_x = -kx,$$

где x – величина смещения (растяжения или сжатия), k – коэффициент упругости или жесткость деформируемого тела, F_x – проекция упругой силы на направление смещения.

Знак «минус» означает, что направление упругой силы противоположно направлению смещения частиц тела.

Масса – скалярная физическая величина, определяющая инерционные и гравитационные свойства тел.

Сила тяжести – это сила, с которой притягивается любое тело к Земле. Под действием силы притяжения к Земле все тела падают с одинаковым ускорением $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, то в системе отсчёта, связанной с Землей, на всякое тело массы m действует сила

$$P = mg .$$

Вес тела – сила, с которой тело вследствие тяготения к Земле действует на опору или натягивает нить подвеса. Сила тяжести действует всегда, а вес проявляется лишь тогда, когда на тело кроме силы тяжести действуют другие силы. Сила тяжести равна весу тогда, когда ускорения относительно земли нет.

4.2. Классификация преобразователей силы.

Динамометры на основе упругих элементов

Механические усилия, действующие на различные объекты и тела бывают сосредоточенные и распределенные. Различают сосредоточенные линейно направленные усилия – силы и вращательные усилия – крутящие моменты или моменты силы. Распределенные усилия делят на внешние – давления и внутренние – механические напряжения, возникающие в теле исследуемого объекта. Измерение механических усилий является неотъемлемой частью многих научных исследований, технологических процессов, медицинской диагностики.

Методы измерений различных видов механических усилий имеют много общего. По виду непосредственно измеряемой величины их можно разделить на 4 группы, основанные на измерении:

- деформаций исследуемого объекта или упругого элемента, возникающих под действием определяемого усилия;
- параметров или свойства преобразователей, изменяющихся под действием определяемых усилий (электрическое или магнитное сопротивление, частота собственных колебаний);
- непосредственно свойств исследуемых объектов или сред, зависящих от действующих на них усилий (скорость распространения звука, теплопроводность газа, температура);
- усилия, уравнивающего измеряемое усилие.

Наиболее простым и распространенным приспособлением для измерения силы являются механические пружинные и рычажные динамометры

на основе упругих элементов. В пружинном динамометре сила или момент силы передаётся пружине, которая в зависимости от направления силы сжимается или растягивается (рис. 4.1). Величина упругой деформации пружины пропорциональна силе воздействия и регистрируется. В рычажном динамометре действие силы деформирует рычаг, величина деформации которого после регистрируется. Различают динамометры работающие на сжатие и на растяжение. Диапазон измерения динамометров от долей ньютона, до 20 МН (2000 тс). Динамометры применяют как для измерения небольших усилий в заводских лабораториях, как образцовые меры, так и в спортивных залах и поликлиниках. Это медицинские кистевые силомеры, становые, для измерения силы мышечных групп человека, спортивные и т.д. Динамометры также можно встретить и в составе различных приборов и установок. Применяют также тяговые динамометры для измерения силы тяги тракторов, морских буксиров, локомотивов и т.д.

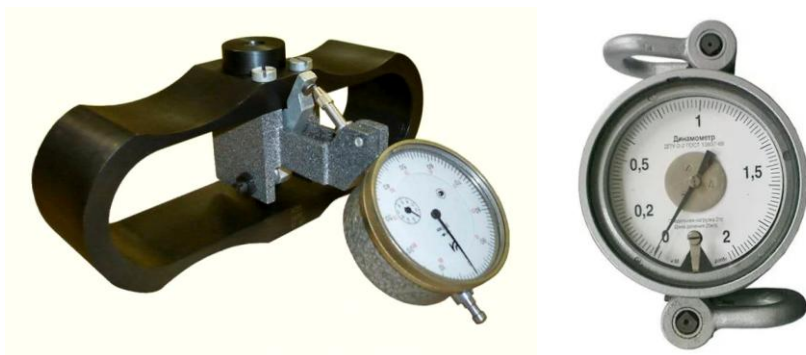


Рис. 4.1. Механические пружинные динамометры сжатия и растяжения

Отсчет показаний силы осуществляется по индикатору часового типа и приложенной к динамометру градуировочной таблице или по специально отградуированному индикатору в единицах силы. В результате остаточной деформации упругих элементов их показания при росте и снятии нагрузки могут отличаться в пределах погрешности, т.е. имеют гистерезис. Погрешность динамометров лежит в пределах от 0,1% до 2%.

Большое количество устройств с электрическим выходом для измерения силы основано на методе преобразования измеряемой величины в деформацию упругого элемента и последующее преобразование механического напряжения в электрический сигнал с помощью тензорезисторных, емкостных, индуктивных, пьезоэлектрических, магнитоупругих, виброчастотных или других типов преобразователей. В таких средствах изме-

рений основным конструктивным элементом, оказывающим решающее влияние на точность измерения силы, является упругий элемент.

Хорошими метрологическими характеристиками обладают частотные приборы с вибростержневыми преобразователями усилий. На рис. 4.2. показаны две конструкции вибростержневых преобразователей, применяемые в силоизмерительных устройствах и весах. Частотно-зависимым элементом в таких датчиках является резонатор в виде тонкой пластинки 2, изготавливаемой заодно с упругим элементом 3 из одного куска металла. Режим автоколебаний осуществляется с помощью возбудителя 1 и приемника колебаний 4, соединенных с выходом и входом усилителя 7 (рис. 4.2 а). Особенности преобразователя являются низкий уровень механических напряжений в резонаторе и в упругом элементе ($100 \div 150$ МПа), полная или частичная компенсация погрешностей от несовершенства упругих свойств материала преобразователя, хорошая помехоустойчивость вследствие высокого уровня выходного сигнала, достигающего несколько вольт.

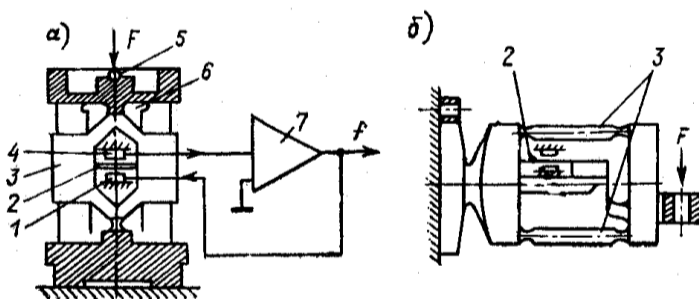


Рис. 4.2. Динамометры с электрическим выходом на вибростержневом преобразователе

Для исключения погрешности от изгибающих усилий и крутящих моментов используются шаровой силововодящий элемент 5 и плоская мембрана 6 (рис. 4.2 а). Применение сферического силововодящего элемента также локализует точку приложения силы и повышает воспроизводимость результатов измерений. Упругая система такого вида применяется в динамометрах для измерения сжимающих усилий до 1 МН с погрешностью $\pm 0,1$ %.

В многокомпонентных динамометрах применяется упругий элемент в виде параллелограмма (рис. 4.2 б), что позволяет уменьшить погрешность от не измеряемых компонентов. В цифровых весах используются датчики с упругой системой в виде углового рычага с опорой на двух упругих шарнирах.

Такие преобразователи, используемые в серийных торговых весах на нагрузки 50...500 Н (5...50 кг) и имеют класс точности 0,04.

Для измерения моментов силы или крутящих моментов наиболее широко используются методы и устройства, основанные деформации упругого элемента, выполняемого в виде сплошных, полых или плоских валов (торсионов), спиральных пружин, подвесов и растяжек. Приборы, основанные на этом методе, называются торсиометрами.

Часто на практике возникает необходимость не только измерять крутящие моменты, но и создавать необходимые моменты. Например, при затягивании гаек и болтов необходимым моментом, который можно контролировать по шкале. Для этого используют динамометрические ключи, показанные на рис. 4.3.

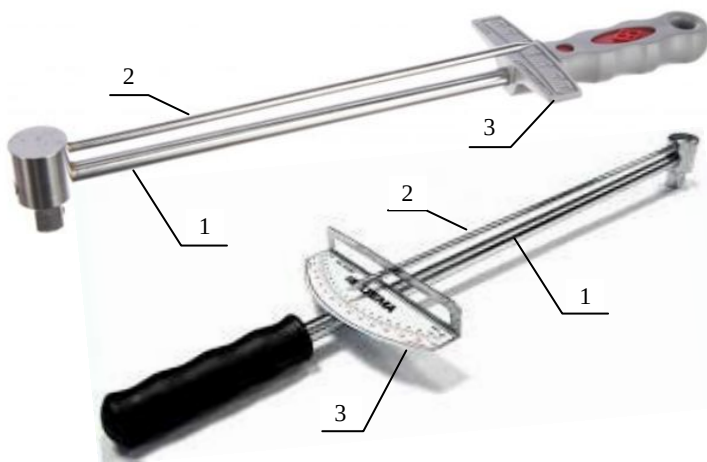


Рис. 4.3. Динамометрические ключи

При затягивании гайки динамометрическим ключом деформируется упругий стержень 1 и стрелка 2 показывает на шкале 3 приложенный крутящий момент.

4.3. Использование тензорезисторов для измерения силы

Тензорезисторами называют измерительные преобразователи, осуществляющие преобразование механических деформаций в изменение электрического сопротивления, т.е. основанные на тензоэффекте. Тензоэффектом называется свойство проводниковых и полупроводниковых материалов изменять электрическое сопротивление при изменении объёма или напряжённого состояния.

У полупроводников материалов тензоэффект связан со значительным изменением удельного сопротивления; знак тензоэффекта зависит от типа проводимости полупроводникового материала, а величина – от кристаллографического направления. Наиболее сильно тензорезистивный эффект выражен в полупроводниковых кристаллах германия и кремния. Для создания полупроводниковых тензорезистивных элементов применяются преимущественно кремний, поскольку он, по сравнению с германием, имеет более высокую тензочувствительность, большую механическую прочность и выдерживает более высокие температуры. Тензометрические свойства кремния анизотропны и зависят от кристаллографических направлений. Наибольшей тензочувствительностью обладают тензорезисторы, у которых направление деформации совпадает с кристаллографическим направлением.

Тензорезисторы характеризуются рядом параметров, основными из которых являются:

- тензочувствительность K_T ;
- номинальное сопротивление R ;
- допустимая деформация $E_{\text{доп}}$;
- погрешность преобразования.

Для обоих видов тензочувствительных материалов, проводниковых и полупроводниковых, тензоэффект характеризуется величиной тензочувствительности, устанавливающей связь между относительным изменением сопротивления и относительной деформацией в направлении измерений.

Чувствительность тензорезистора описывается зависимостью

$$K_T = \frac{\Delta R \cdot l}{R \cdot \Delta l},$$

где R – номинальное начальное сопротивление тензорезистора при заданной температуре окружающей среды в отсутствии механических нагрузок, l – длина недеформированного тензочувствительного элемента, ΔR – абсолютное изменение сопротивления тензорезистора, вызванное деформацией, Δl – абсолютное изменение длины тензочувствительного элемента вследствие деформации.

Величины номинального сопротивления проволочных и фольговых тензорезисторов находятся в пределах 10...800 Ом, полупроводниковых – 50...50000 Ом.

Одной из важных характеристик тензорезисторов является допустимая деформация $E_{\text{доп}}$. Её превышение приводит к появлению остаточных деформаций и даже обрыву проволочных проводников и разрушению пластины полупроводниковых преобразователей. Для тензорезисторов $E_{\text{доп}} = (3...5) \cdot 10^{-3}$.

Погрешности измерения тензорезисторами возникают за счёт следующих основных факторов:

- влияния температуры преобразователя на его сопротивление и линейное расширение;
- ползучесть характеристики, т.е. её изменения, вызываемого остаточными деформациями в преобразователе при длительном действии значительных по величине нагрузок, близких к допустимым;
- невоспроизводимости характеристики преобразования при нагрузке и разгрузке;
- изменения крутизны характеристики преобразования от времени из-за старения материалов, особенно из-за изменения свойств клеящих компонентов;
- снижения чувствительности при увеличении частоты деформаций, когда длина распространяющейся в детали звуковой волны деформации становятся соизмеримой с базой преобразователя.

Тензорезистор представляет собой чувствительный элемент в виде зигзагообразного проводника, нанесённого на гибкую подложку. Общий вид и различные типы тензорезисторов представлены на рис. 4.4. Они представляют собой полоску тонкой рисовой бумаги или эластичную полимерную плёнку 1, в которую вклеивается решётка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки 2 диаметром 0,02...0,05 мм. На полимерной основе решётка обычно протравливается из тонкой фольги. К концам проволоки присоединяются (пайкой или сваркой) выводные медные проводники 3. Сверху преобразователь покрывается слоем лака 1. Такой преобразователь, будучи приклеенным к испытуемой детали, воспринимает деформации её поверхностного слоя. Таким образом, естественной входной величиной наклеиваемого тензопреобразователя является деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации.

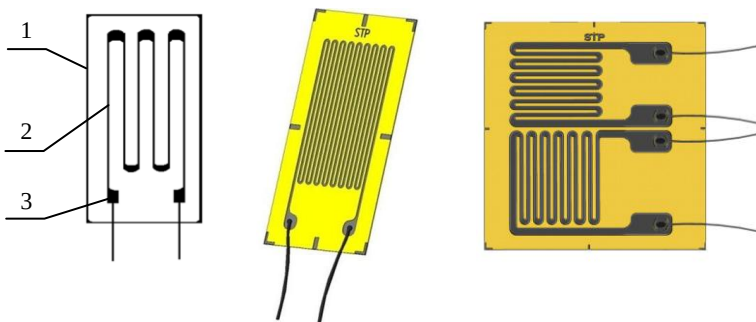


Рис. 4.4. Тензорезисторы

Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом.

Тензорезисторы изготовленные методом травления из фольги имеют толщину 4...12 мкм и образуют решётку с выводами, как показано на рис. 4.4. Такая конструкция тензорезистора позволяет изготавливать на одной подложке несколько тензорезисторов ориентированных в перпендикулярных направлениях.

В последние годы появился ещё один способ массового изготовления тензорезисторов, заключающийся в вакуумной возгонке тензочувствительного материала и последующей конденсации его на подложку. Такие тензорезисторы получили название плёночных.

В качестве измерительной цепи для тензорезисторов обычно применяют делитель напряжения или мостовую схему. Делитель напряжения с питанием постоянным током применяют лишь в том случае, когда интересуются только переменной составляющей измеряемой величины, при этом постоянная составляющая падения напряжения на сопротивлении R_n тензопреобразователя, в сотни раз превышающая переменную составляющую, отфильтровывается разделительным конденсатором C . Во всех других случаях в качестве измерительной цепи используется одинарный мост постоянного или переменного тока, показанный на рис. 4.5.

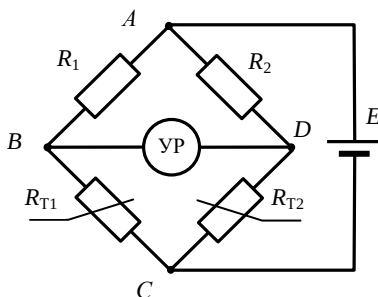


Рис. 4.5. Мостовая схема подключения тензорезистора

Тензорезисторы обычно включают в одно плечо или в два плеча R_{T1} , R_{T2} моста постоянного тока. Схема включения в два плеча выполняется обычно тензорезисторами с перпендикулярной ориентацией, причем один тензорезистор располагают по линии действия деформации, другой перпендикулярно этой линии. Такое включение позволяет существенно ослабить температурную зависимость и применяется на объектах с изменяющейся температурой. Питание моста осуществляется в диагональ AC . Мост предварительно уравнивают резисторами R_1 или R_2 в отсутст-

вии приложенной силы. Сигнал разбаланса моста формируется в измерительной диагонали BD моста, который затем поступает в указатель равновесия УР. Указатель равновесия градуируют в единицах измеряемого механического напряжения.

На исследуемую деформируемую поверхность тензорезисторы обычно приклеивают клеем или используют специальные захваты. Путем изменения формы упругого элемента и типа захватов создаются тензометры различных назначений, например для измерений угла закручивания образца или размеров трещин. Достоинствами таких тензометров являются относительно малая основная погрешность (0,2...0,5 %) при погрешности линейности и гистерезиса 0,05...0,2 % и высокая собственная частота датчика (10 кГц).

При испытании образцов материалов тензометры с тензорезисторами применяются в основном для измерения деформации до 50 % от базы при значениях базы 2,5...100 мм.

Для измерения деформаций и механических напряжений при натуральных испытаниях различных машин, конструкций транспортных средств и других изделий наиболее широко используется метод, основанный на применении дискретных металлических и полупроводниковых тензорезисторов.

Проволочные, фольговые, пленочные и металлические тензорезисторы применяются для измерений статических деформаций 0,005...2 %, полупроводниковые – до 0,1...0,2 %, свободные проволочные тензорезисторы, которые закреплены только по концам базы, а также эластичные электрохимические тензорезисторы могут использоваться для измерения деформаций соответственно до 5...10 % и 30...50 %. В динамическом режиме максимально допустимые значения деформаций для проволочных и полупроводниковых тензорезисторов должны быть на порядок меньше, так как при таком режиме уменьшается надежность тензорезисторов.

Часто тензорезисторы включают в состав различных установок и испытательными машинами. Тензометры, используемые совместно с испытательными машинами, обеспечивают измерения с относительно малыми погрешностями (0,2...1,5 %), поскольку их можно градуировать совместно с датчиком при помощи образцовых средств измерений длины. Особенностью испытаний сложных изделий является наличие большого числа точек тензометрирования, поэтому для этих целей используются многоканальные тензостанции и ИИС для прочностных испытаний.

В качестве примера сложной тензостанции рассмотрим бесконтактный моментомер (торсиометр) для измерения крутящего момента на вращающемся валу, рис. 4.6. Выходной сигнал пропорциональный крутящему моменту и соответственно скручивающему механическому напряжению в материале вала формируется при помощи тензорезисторов. Тензорези-

сторы включены в плечи мостовой измерительной схемы с преобразователем напряжение-частота (ПНЧ) 3. Питание измерительной схемы и ПНЧ, а также вывод выходного сигнала осуществляются через вращающийся трансформатор 5. На валу 1 расположены тензометрический мост 2, составленный из четырех тензорезисторов R_T , преобразователь напряжение-частота 3, цепь управления 4, вторичная обмотка с числом витков ω_2 вращающегося трансформатора 5, диод V и ключ S_1 .

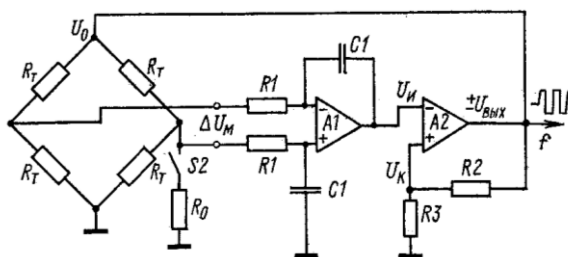
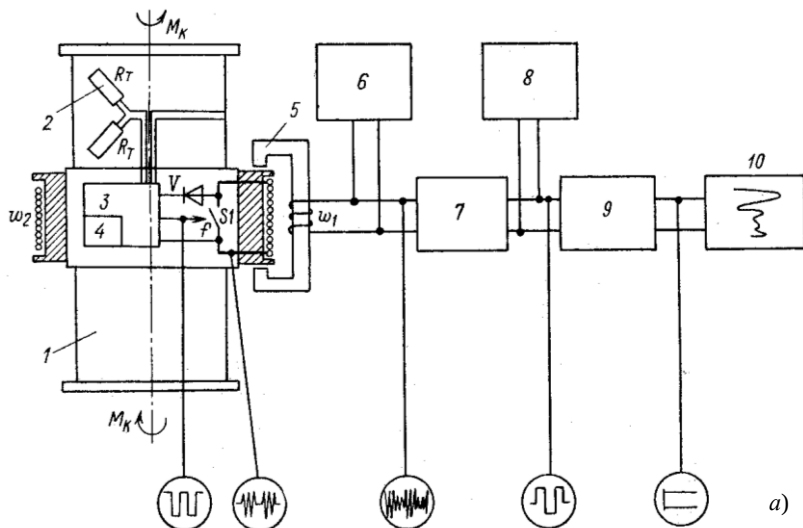


Рис. 4.6. Бесконтактный моментомер

Первичная обмотка вращающегося трансформатора ω_1 питается от генератора синусоидального напряжения 6 с частотой 5...10 кГц. В течение полупериода выходного напряжения преобразователя 3, когда ключ разомкнут, напряжение вторичной обмотки трансформатора выпрямляет-

ся диодом V , стабилизируется и питает измерительную цепь. Напряжение разбаланса с диагонали тензометрического моста ΔU_m (рис. 4.6 б) подается на вход интегратора на операционном усилителе A_1 , выходное напряжение которого U_n сравнивается компаратором A_2 с опорным напряжением U_k , пропорциональным напряжению питания моста U_0 . При неизменном значении ΔU_m напряжение на выходе интегратора линейно растет до тех пор, пока не станет равным опорному напряжению U_k . При срабатывании компаратора изменяется полярность напряжений U_0 , ΔU_m , U_k , начинается новый цикл интегрирования и т. д.

Таким образом, на выходе компаратора имеет место напряжение прямоугольной формы, частота которого линейно зависит от относительного разбаланса моста. Для тензометрического моста с четырьмя рабочими плечами,

$$\frac{\Delta U_m}{U_0} = \frac{\Delta R_T}{R_T} = \varepsilon \quad \text{и частота напряжения на выходе компара-}$$

$$\text{тора определяется выражением } f = \varepsilon \frac{R_2 + R_3}{4 R_1 C_1 C_3}.$$

Сигнал с выхода ПНЧ в виде частотно-модулированного переменного напряжения управляет ключом S_1 , который с частотой f накоротко замыкает вторичную обмотку трансформатора ω_2 , вызывая модуляцию напряжения на первичной обмотке ω_1 . Это напряжение после амплитудного демодулятора 7 подается на аналоговый или цифровой частотомер 8, а также через частотный демодулятор 9 поступает на вход регистрирующего прибора 10. При несущей частоте 5 кГц чувствительность прибора к относительному изменению сопротивления тензорезисторов составляет $S = \Delta f / \varepsilon = 5000 \text{ Гц}/\%$.

Для периодической коррекции погрешности тензорезисторного моста используется метод образцовых сигналов. Параллельно одному из тензорезисторов с помощью геркона S_2 (рис. 4.6 б) подключается резистор R_0 с известным сопротивлением, что приводит к определенному изменению частоты выходного сигнала. Управление герконом S_2 осуществляется бесконтактным способом путем приближения к нему внешнего постоянного магнита.

4.4. Методы измерения массы

Методы измерения массы основаны на принципе эквивалентности инертной и гравитационной массы. Приборы для измерения массы по действующей на них силе тяжести называют весами.

Измерение массы основано на использовании закона всемирного тяготения, согласно которому гравитационное поле Земли притягивает мас-

су с силой, пропорциональной этой массе. Силу притяжения сравнивают с известной по величине силой, создаваемой различными способами:

- для уравнивания используется груз известной массы;
- уравнивающее усилие возникает при деформации упругого элемента;
- уравнивающее усилие создается пневматическим устройством;
- уравнивающее усилие создается гидравлическим устройством;
- уравнивающее усилие создается электродинамически при помощи соленоидной обмотки, находящейся в постоянном магнитном поле;
- уравнивающее усилие создается при погружении тела в жидкость.

Первый способ является классическим. Мерой во втором способе является величина деформации; в третьем - давление воздуха; в четвертом - давление жидкости; в пятом - ток, протекающий по обмотке; в шестом - глубина погружения и подъемная сила.

При каждом взвешивании выполняют хотя бы одну из четырех основных операций - определение неизвестной массы тела ("взвешивание"), отмеривание определенного количества массы ("отвешивание"), определение класса, к которому относится подлежащее взвешиванию тело ("тарировочное взвешивание" или "сортировка"), взвешивание непрерывно протекающего материального потока.

4.5. Основные типы весов. Механические и электронные весы

Весы классифицируют по различным признакам.

По принципу действия различают: механические, электромеханические, оптикомеханические, радиоизотопные, гидравлические и др.

По назначению выпускают весы: образцовые, предназначенные для поверки гирь, лабораторные, включая аналитические с дискретностью не более 0,1 мг, прецизионные весы с дискретностью от 1 г до 1 мг, микроаналитические и пробирные, весы специализированные, а также весы общего назначения для торговой сети, промышленные весы.

Лабораторные весы можно также классифицировать по типу калибровки, а именно на лабораторные весы с калибровкой внешней гирей, внутренней гирей и с автоматической калибровкой.

Специализированные весы включают: медицинские для работы в медицинских учреждениях, детские, осуществляющие контроль за прибавкой веса ребенка и с запоминанием предыдущих взвешиваний.

Весы общего назначения в зависимости от величины наибольшего предела измерения делят на: настольные, напольные, тарные с пределом

менее 50 кг, фасовочные – для взвешивания и расфасовки продукции малой до 35 кг массы, передвижные – от 50 кг до 6 т, стационарные (вагонеточные, автомобильные, вагонные и элеваторные - бункерные) – от 5 до 200 т.

Кроме того весоизмерительные и весодозирующие устройства по назначению можно объединить в следующие шесть групп:

1. Весы лабораторные, настольные, платформенные передвижные, стационарные и др. Весы этой группы изготавливают с коромыслами шкального типа, циферблатными квадрантными указателями, с цифровой индикацией.

2. Конвейерные и ленточные весы непрерывного действия, ведущие непрерывный учёт массы транспортируемого материала. Конструктивно конвейерные весы отличаются от ленточных непрерывного действия тем, что они выполняются в виде отдельного весового устройства, устанавливаемого на определённом участке ленточного конвейера. Ленточные же весы непрерывного действия представляют собой самостоятельные ленточные транспортеры небольшой длины, оснащённые весоизмерительным устройством.

3. Дозаторы для суммарного учёта (порционные весы) и дозаторы для фасовки сыпучих материалов.

4. Дозаторы непрерывного действия, используемые в различных технологических процессах, где требуется непрерывная подача материала с заданной производительностью.

5. Метрологические весы для проведения поверочных работ, а также гири и передвижные средства поверки.

6. Весоизмерительные устройства, служащие для определения не массы, а других параметров (например, подсчёта равновесных деталей или изделий, определения крутящего момента двигателей и т.д.).

Механические весы основаны на сравнении масс при помощи рычагов, пружин, поршней и чашек весов (см. рис. 4.7).

Принцип работы механических весов заключается в уравнивании опирающегося на призмы подвижного рычага (коромысла) с двумя чашами (рис. 4.7 а). На одну чашу укладывается взвешиваемый предмет, на другую чашу несколько гирь до полного уравнивания взвешиваемого предмета, о чем свидетельствует одинаковый уровень указателей чаш. Вес предмета определяется после полного уравнивания суммированием веса всех гирь. Такие весы пригодны для взвешивания товаров до 10 кг, а напольные торговые и складские до 50 кг и более. В рычажно-пружинных механических весах гирями достигается частичное уравнивание, а отсчет разности осуществляется по стрелке на шкале циферблата с добавлением суммы веса всех гирь. В таких весах стрелка связана с рычажным механизмом. Как правило, пружинная часть весов работает в

пределах до 1 кг с ценой деления 5 г. Уравновешивающие гири не должны превышать суммарно 5 кг. Имеются также весы с встроенной в корпус системой противовесов (рис. 4.7 в). Они имеют одну чашу и круглую шкалу. Пределом измерения таких весов является 6 кг. Цена деления 5 г. В пружинных весах вес предмета уравновешивается упругостью пружины (рис. 4.7 б). Это, как правило, бытовые весы с пределом взвешивания до 5 кг и ценой деления 10 г. Для всех механических весов обязательным требованием является установка в горизонтальном положении.



Рис. 4.7. Механические весы

В электромеханических и электронных весах усилие, получаемое от взвешиваемого груза, измеряется путем деформации упругого элемента с помощью тензорезисторных, тензокварцевых, индуктивных, емкостных и вибродаточных преобразователей. Полученный электрический сигнал преобразователя пропорциональный весу взвешиваемого груза обрабатывается электронной схемой, включающей усилитель, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор и цифровой экран, и индицируется в виде веса груза.

Электронные весы отличаются от механических высокой точностью. Погрешность электронных весов среднего класса составляет $\pm 0,1$ г.

В отличие от механических весов, электронные весы имеют удобный информационный дисплей, на котором отображаются данные о весе и стоимости продукта (рис. 4.8 а, б). У них имеется ряд различных удобных опций, как например, расчет по цене единицы стоимость взвешенного товара, ввод веса упаковки и тары, сброс и установка нуля, печать чеков и

этикеток со штрих-кодом для учета товара и т.д. Такими функциями обладают торговые весы, используемые в гипермаркетах. Электронные весы высокого класса можно подключать к компьютеру для сбора данных.



Рис. 4.8. Электронные весы

Торговые весы обычно разделяются по наибольшему пределу взвешивания на 3 категории, это 6, 15 и 30 кг (рис. 4.8 *а, б*).

Широкое распространение в современной жизни нашли бытовые (кухонные) весы (рис. 4.8 *в*).

На складах и оптовых базах применяют напольные товарные весы с пределом взвешивания до 600 кг (рис. 4.8 *з*). На производстве применяют промышленные весы, которые могут быть встроены в пол (рис. 4.8 *д*). Применяют также крановые электронные весы (рис. 4.8 *е*) с диапазоном взвешивания от 0,5 до 50 тонн.

Основой всех электронных весов является преобразующий элемент.

Торговые и напольные товарные весы (рис. 4.8 *а, б, з*) построены на основе вибросистотного преобразователя, в котором упругим элементом является струна с электромагнитами и индуктивными преобразователями перемещений, образующий вместе со струной и усилителем автогенератор. В результате струна, находясь в упругом состоянии, вибрирует в режиме автоколебаний с частотой 5...6 кГц. Под действием силы тяжести P взвешиваемого груза происходит натяжение струны. Это приводит к увеличению механического напряжения в струне и повышение собственной частоты ее колебаний. Частота колебаний струны функционально связана с измеряемым весом, но имеет нелинейную зависимость. Поэтому на производстве статическую характеристику линеаризуют путем построения зависимости квадрата частоты от массы и определения чувствительности всем диапазоне измерения. Эта зависимость является частью программного обеспечения этих весов.

Бытовые весы (рис. 4.8 *в*), промышленные и крановые электронные весы (рис. 4.8 *д, е*) построены на базе тензокварцевого преобразователя, который представляет собой две тонкие кварцевые пластины пьезоэлемента с электродами, приклеенными на упругие элементы. Под действием веса груза один упругий элемент сжимается, другой растягивается. В результате в каждом пьезоэлементе возбуждаются колебания на частоте, зависящей от механического напряжения в пьезоэлементе под нагрузкой. Выходной сигнал преобразователя лежит в диапазоне 5...7 кГц. Преимуществами тензокварцевого преобразователя является линейная статическая характеристика и независимость выходного сигнала от температуры окружающей среды, что позволяет их использовать в условиях больших перепадов температуры.

При эксплуатации весов следует иметь в виду, что фактически датчик реагирует не на массу груза, а на его силу тяжести (вес), которая зависит от значения ускорения свободного падения. Эта физическая константа в свою очередь зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Поэтому желательно весы градуировать по месту эксплуатации.

4.6. Понятие давления. Закон Паскаля

Давление – физическая величина, численно равная силе F , действующей на единицу площади поверхности S перпендикулярно этой поверхности.

Закон Паскаля. Давление, оказываемое на жидкость или газ, передается в любую точку жидкости или газа без изменения во всех направлениях, причем давление одинаково передается по всему объему, занятому покоящейся жидкостью или газом.

Закон Паскаля выражается формулой

$$p = \frac{F}{S},$$

где p – давление, F – приложенная сила, S – площадь поверхности.

Закон является следствием закона сохранения энергии и справедлив для сжимаемых жидкостей и газов.

При определении величины давления принято различать давление абсолютное, атмосферное, избыточное и вакуумметрическое.

Абсолютное давление (p_a) – это давление внутри какой-либо системы, под которым находится газ или жидкость, отсчитываемое от абсолютного нуля.

Атмосферное давление (p_b) – создается массой воздушного столба земной атмосферы. Оно имеет переменную величину, зависящую от высоты местности над уровнем моря, географической широты и погоды.

Избыточное давление определяется разностью между абсолютным давлением (p_a) и атмосферным давлением (p_b): $P_{\text{изб}} = p_a - p_b$.

Абсолютное давление ниже атмосферного называется разреженным, а глубокое разрежение – **вакуум** или **вакуумметрическое давление**.

Количественно вакуумметрическое давление определяется разностью между атмосферным давлением и абсолютным давлением внутри вакуумной системы:

$$P_{\text{вак}} = p_b - p_a.$$

Для измерения средних и высоких давлений применяются кратные единицы: килопаскаль (кПа), мегапаскаль (МПа) и др.

При измерении давления в движущихся средах под понятием давления понимают статическое и динамическое давление.

Статическое давление – это давление, зависящее от запаса потенциальной энергии газовой или жидкостной среды; определяется статическим напором. Оно может быть избыточным или вакуумметрическим, в частном случае может быть равно атмосферному.

Динамическое давление – это давление, обусловленное скоростью

движения потока газа или жидкости. Определяется оно через скоростной (динамический) напор по следующей формуле:
$$p_d = \rho \frac{v^2}{2},$$

где p_d – динамическое давление; ρ – плотность движущегося вещества; v – скорость движущегося потока.

Полное давление (p_n) движущейся среды складывается из статического ($p_{ст}$) и динамического (p_d) давлений: $p_n = p_{ст} + p_d$.

Приборы контроля давления классифицируются в зависимости от метода измерения, используемого в них, а также по характеру измеряемой величины.

В Международной системе единиц (СИ) давление измеряется в паскалях (русское: Па; международное: Ра) – *ньютон на квадратный метр* (1 Н/м^2).

Применяются также следующие единицы измерения давления:

- техническая атмосфера ($1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98066 \text{ Па} = 10 \text{ м вод. ст.}$),
- физическая атмосфера ($1 \text{ атм} = 1,033 \text{ ат} = 101325 \text{ Па} = 1,013 \text{ бар} = 760 \text{ мм р.ст.}$),
- $1 \text{ бар} = 1,0197 \text{ ат} = 0,98692 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па} \approx 1 \text{ ат}$.

Обозначают **абсолютное** (ата), **избыточное** (ати).

4.7. Методы и средства измерения давления

Физические основы измерения давления, положенные в основу и определяющие принцип действия соответствующих средств измерения, подразделяются на следующие группы:

- *жидкостные*, в которых измерение давления происходит путем уравнивания его столбом жидкости соответствующей высоты;
- *пружинные* (деформационные), в которых значение давления измеряется путем определения меры деформации упругих чувствительных элементов;
- *грузопоршневые*, основанные на уравнивании сил создаваемых с одной стороны измеряемым давлением, а с другой стороны калиброванными грузами действующими на поршень, помещенный в цилиндр;
- *электрические*, в которых измерение давления осуществляется путем преобразования его значения в электрическую величину, и путем замера электрических свойств материала, зависящих от величины давления;
- *ионизационные*, в которых под давлением происходит изменение степени ионизации молекул газа потоком электронов, испускаемых катодом за счет термоэлектрической эмиссии или за счет излучения радиоактивных веществ;

– *теплофизические*, в которых давление изменяет теплопроводность газов.

По виду измеряемого давления средств измерения подразделяют на следующие:

– *манометры*, предназначенные для измерения избыточного давления;

– *вакуумметры*, служащие для измерения разрежения (вакуума);

– *мановакуумметры*, измеряющие избыточное давление и вакуум;

– *напоромеры*, используемые для измерения малых избыточных давлений;

– *тягомеры*, применяемые для измерения малых разрежений;

– *тягонапоромеры*, предназначенные для измерения малых давлений и разрежений;

– *дифференциальные манометры (дифманометры)*, с помощью которых измеряют разность давлений, ни одно из которых не равно атмосферному;

– *барометры*, используемые для измерения барометрического давления.

Жидкостные средства измерения давления. Действие жидкостных средств измерений основано на гидростатическом принципе, при котором измеряемое давление уравновешивается давлением столба затворной (рабочей) жидкости. Разница уровней в зависимости от плотности жидкости является мерой давления.

Простейшим прибором для измерения давления или разности давлений является двухтрубный (или U-образный) манометр (рис. 4.9 а), представляющий собой согнутую стеклянную трубку, заполненную рабочей жидкостью (ртутью или водой) и прикрепленную к панели со шкалой.

Один конец трубки соединяется с атмосферой, а другой подключается к объекту, где изменяется давление. Его значение определится из выражения

$$p = \rho gh ,$$

где p – измеряемое давление, Па; h – разность уровней жидкости, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, 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 зависит от сечения трубки.

Более удобным средством измерения давления является однотрубный (чашечный) манометр (рис. 4.9 б), в котором одна из трубок заменена сосудом, диаметр его, как правило, в 20 раз больше диаметра трубки. Прин-

цип действия манометра аналогичен рассмотренному выше, однако давление или разрежение будет определяться по формуле

$$p = \rho gh(1 + d^2/D^2) = \rho gh(1 + f/F),$$

где d , D – диаметры трубки и широкого сосуда соответственно, м; f , F – сечения 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 вести только по стеклянной трубке, т.е. по h_1 .

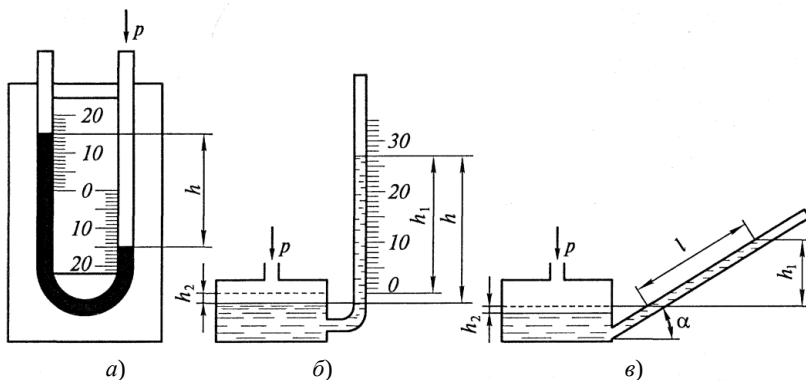


Рис. 4.9. Жидкостные манометры

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

На рисунке 4.9 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.

Учитывая, что $h_1 = l \sin \alpha$ и пренебрегая малостью величины f/F , измеряемое давление можно определить из выражения

$$p = l \rho g \sin \alpha.$$

С уменьшением угла наклона трубки уменьшаются пределы измерения манометром и увеличивается чувствительность.

Рассмотренные выше жидкостные средства измерения давления характерны отсутствием дистанционной передачи показаний, небольшими пределами измерений и низкой прочностью. В то же время благодаря своей простоте, дешевизне и относительно высокой точности измерений они широко распространены в лабораториях и в промышленности при измерениях и при проверке средств измерений других типов.

Деформационные средства измерения давления основаны на уравновешивании силы, создаваемой давлением или вакуумом контролируемой среды на чувствительный элемент, силами упругих деформаций 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. 4.10 а), многовитковые трубчатые пружины (рис. 4.10 б), упругие мембраны (рис. 4.10 в), упругие мембранные коробки (рис. 4.10 г, д), двойные упругие мембранные коробки (рис. 4.10 е, ж), сильфоны (рис. 4.10 з).

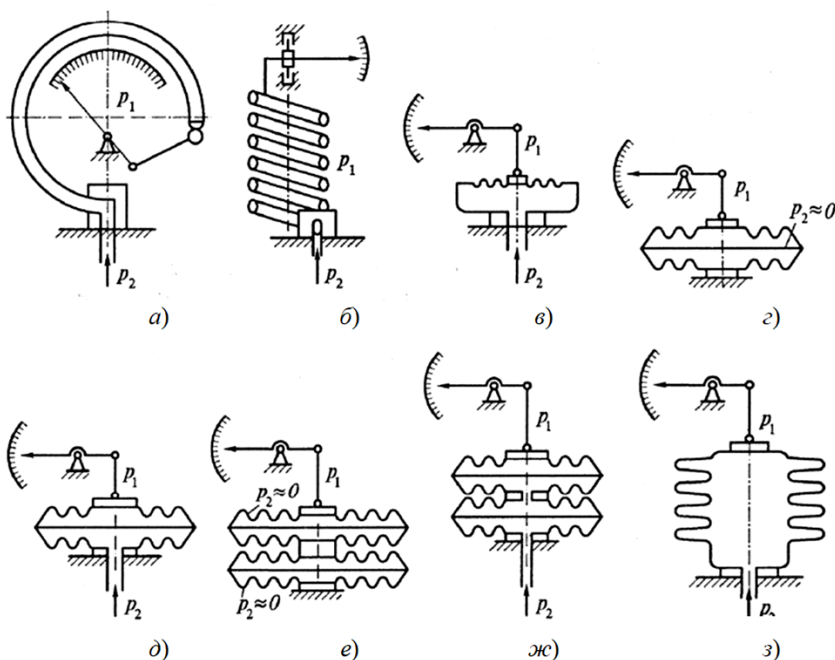


Рис. 4.10. Деформационные чувствительные элементы средств измерения давления

Для изготовления мембран, сильфонов и трубчатых пружин применяются бронза, латунь, хромоникелевые сплавы, отличающиеся достаточно высокой упругостью, антикоррозийностью, малой зависимостью параметров от изменения температуры.

Рассмотрим подробнее некоторые деформационные средства измерения давления.

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

Трубчатая пружина представляет собой тонкостенную, согнутую по дуге окружности, трубку (одно- или многовитковую) 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. 4.11 представлено устройство простейшего пружинного манометра. Он 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 – впаяна в держатель, который присоединен к источнику измеряемого давления при помощи штуцера 8.

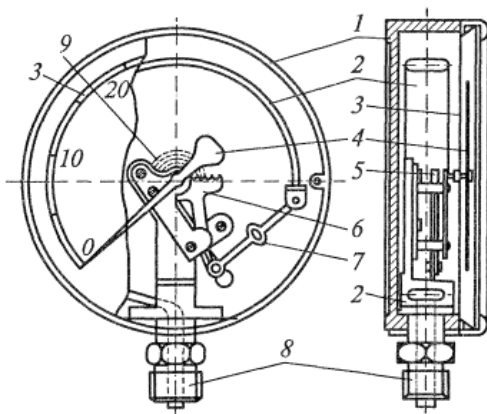


Рис. 4.11. Устройство пружинного манометра:

- 1 – корпус; 2 – полая трубка; 3 – шкала; 4 – стрелка; 5 – шестерня;
6 – зубчатый сектор; 7 – поводок; 8 – штуцер; 9 – пружина

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. Зубчатый сектор 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.

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.

Все рассмотренные выше деформационные средства измерения давления относятся к недистанционным схемам, основанным на принципе прямого преобразования деформации в сигнал, поступающий на показывающее устройство.

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

На рисунке 4.12 показана конструкция мембранного вакуумметра с профильной шкалой.

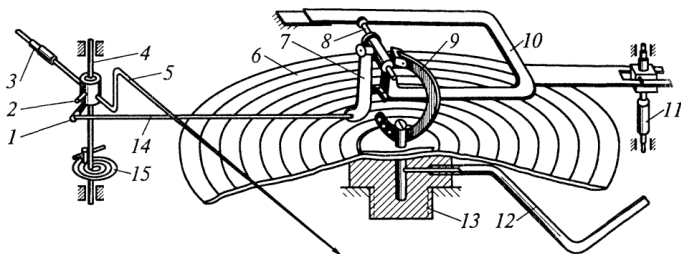


Рис. 4.12. Конструкция мембранного мановакуумметра с профильной шкалой

Чувствительным элементом служит мембранная коробка 6, соединенная с изменяемой 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 этой же оси с помощью стопорного винта 2 закреплена указательная стрелка 5 с противовесом 3. Конец указательной стрелки 5 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.

Сифонные приборы предназначены для измерения избыточного и вакуумметрического давления неагрессивных газов с пределами измере-

ний до 40 кПа, до 400 кПа (как манометры), до минус 100 кПа (как вакуумметры), в интервале $-100...+300$ кПа (как мановакуумметры).

Чувствительным элементом этих приборов является сиффон (см. рис. 4.10 з), представляющий собой тонкостенную цилиндрическую ёмкость с поперечной гофрировкой, которая изменяет свои линейные размеры при перепаде давлений внутри и вне её. Сиффоны изготавливают из фосфористой бронзы, нержавеющей стали или медноникелевого сплава.

Применяют сиффоны диаметром 8...150 мм толщиной стенки 0,1...0,3 мм, с числом волн 4; 6; 10 и 16.

Приборы рассматриваемого типа конструктивно состоят из двух частей: сиффонного блока и регистрирующего блока (показывающего или самопишущего). Оба блока встроены в единый корпус. Класс точности самопишущих приборов 1 или 1,5.

Мембранные дифференциальные манометры, представляют собой дифференциальный датчик давления с общим упругим элементом в виде мембраны или мембранной коробки. Они являются бесшкальными первичными измерительными приборами, предназначенными для измерения давления неагрессивных сред, преобразующими измеряемую разность давлений в унифицированный сигнал постоянного тока 0...5 мА. Дифманометр представляет собой датчик мембранного типа (рис. 4.13) с дифференциально-трансформаторной системой передачи значения измеряемой величины на вторичный прибор. Работают при давлении 20...100 кПа.

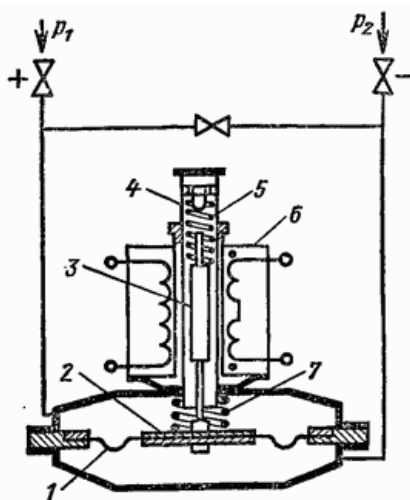


Рис. 4.13. Устройство мембранного дифманометра

Чувствительным элементом дифманометра является мембрана 1, в центре которой имеется шайба 2. К шайбе прикреплен железный сердечник 3 дифференциально-трансформаторного преобразователя 6.

В верхнюю камеру подается большее (плюсовое) измеряемое давление, в нижнюю – меньшее (минусовое) давление. Сила измеряемого перепада давления уравнивается за счет силы деформации пружин 5 и 7. При увеличении перепада давления мембрана перемещает сердечник 3 дифференциально-трансформаторного преобразователя вверх или вниз в зависимости от величины и знака перепада давления. При равенстве давлений p_1 и p_2 диафрагма уравнивается пружинами 7 и 5. Пружина 5 и гайка 4 служат для настройки дифманометра.

Полученное выходное напряжение дифманометра далее используется в системе автоматического регулирования для поддержания заданного значения перепада давления.

Наиболее широкое распространение в промышленности в последнее время получили мембранные и сифонные дифференциальные манометры.

Электрические манометры и вакуумметры. 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.

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. 4.14. 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 $R_1 - R_4$. Такая схема включения тензорезисторов является температурнезависимой.

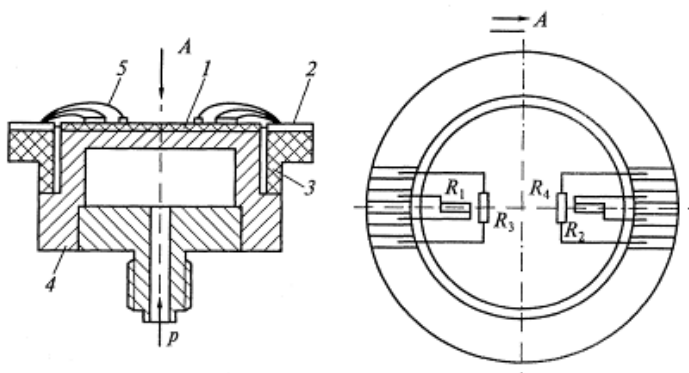
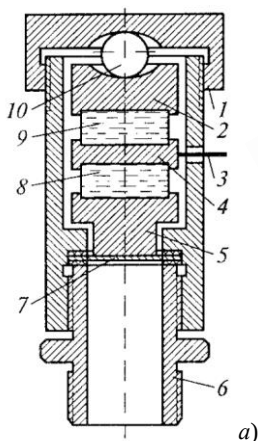


Рис. 4.14. Конструкция тензометрического манометра:

1 – сапфировая пластина; 2 – сборные пластинки; 3 – кольцо из диэлектрика;
4 – корпус; 5 – выводные провода

Пьезоэлектрические манометры применяют при измерении пульсирующего с высокой частотой давления в механизмах с допустимой нагрузкой на чувствительный элемент до $8 \cdot 10^3$ ГПа. Конструкция и вид преобразователя пьезоэлектрического манометра показаны на рис. 4.15.



а)



б)

Рис. 4.15. Конструкция и вид пьезоэлектрического преобразователя:

а – конструкция: 1 – крышка; 2, 4 и 5 – металлическая прокладка; 3 – проводник;
6 – штуцер; 7 – мембрана; 8 и 9 – пьезоэлемент; 10 – шарик; б – общий вид

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). Измеряемое давление через мембрану 7 действует на пьезоэлементы 9 и 8, 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.

Величина электрического заряда будет прямо пропорциональна давлению:

$$q = kpS,$$

где q – заряд, Кл; k – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н; p – давление, Па; S – площадь поверхности пластин, м^2 .

4.8. Вопросы для самостоятельной работы

1. Что понимают под силой, весом и давлением?
2. Почему измерение силы, веса и давления так необходимы в технике?
3. Привести методы измерений механических усилий.
4. Пояснить принцип работы преобразователей на основе упругих элементов.
5. Что такое тензорезистор? В чем сущность тензорезистивного эффекта? Привести схему включения тензорезисторов.
6. Пояснить работу бесконтактного моментометра.
7. Какие методы измерения массы вы знаете?
8. Перечислить основные типы весов. Пояснить их работу.
9. Что называется давлением? Привести их виды и соотношение между ними.
10. Пояснить основные методы и средства измерения давления. Дать сравнительную характеристику.
11. В чем состоит физическая ошибка деформационных измерителей давления?
12. Пояснить работу и устройство дифференциального манометра.
13. Пояснить работу и устройство тензометрического манометра.
14. Пояснить работу и устройство пьезоэлектрического манометра.
15. Дать сравнительный анализ достоинств и недостатков методов и средств измерения силы, веса и давления.

5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

5.1. Измерение уровня жидкостей. Закон Архимеда

Измерение уровня жидких и сыпучих сред является неотъемлемой процедурой всех отраслей науки и техники. Измерение уровня необходимо при заполнении емкостей, контроле количества жидкости или сыпучего материала в ёмкости, контроле расхода продукта, дозировании продукта и т.д. Средства измерения уровня называются уровнемерами. Уровнемеры имеют шкалу с нулем в начале и делениями, идущими от нуля в одну сторону. Единицы измерения – сантиметры, дециметры и метры.

Методы и устройства измерения уровня жидкостей, в зависимости от реализованного в них принципа измерения, подразделяют на следующие виды:

- визуальные, в которых используется принцип сообщающихся сосудов;
- поплавковые (механические), в которых для измерения уровня используется поплавок или другое тело, находящееся на поверхности жидкости или в ней;
- гидростатические, основанные на уравнении гидростатики;
- электроконтактные (кондуктометрические или омические), в которых электропроводная жидкость замыкает электрическую цепь;
- емкостные, в которых для измерения используется электрическая ёмкость, зависящая от уровня жидкости;
- радиоволновые (радарные), в которых реализуется метод направленной электромагнитной волны;
- радиоизотопные, в которых используется принцип интенсивности потока ядерных излучений, зависящий от уровня жидкости;
- ультразвуковые, в которых используется принцип отражения звуковой волны от поверхности жидкости.

К методам и устройствам измерения уровня сыпучих материалов добавок к рассмотренных еще относятся:

- маятниковые, основанные на свойстве сыпучих материалов образовывать угол естественного откоса;
- механические контактные, базирующиеся на свойстве сыпучих материалов оказывать давление на дно и стенки заполняемой ёмкости;
- а также поплавковые, электроконтактные, емкостные, ультразвуковые, радиоизотопные, радарные, аналогичные жидкостным уровнемерам.

Поплавковый метод основан на выталкивающей силе действующий на поплавок, находящееся на поверхности жидкости. Поэтому необходимо

рассмотреть закон Архимеда и его физическую сущность применительно в измерению уровня.

Закон Архимеда гласит, что на тело, погружённое в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу объёма жидкости или газа, вытесненного частью тела, погружённой в жидкость или газ.

В соответствии с законом Архимеда для выталкивающей силы выполняется

$$F_A = \rho g V ,$$

где ρ – плотность жидкости или газа, кг/м^3 , g – ускорение свободного падения, м/с^2 , V – объем части тела, погруженное в жидкость или газ, м^3 , F_A – сила Архимеда, Н.

Рассмотрим физические основы измерения уровня жидких и сыпучих сред наиболее распространенными методами.

5.2. Визуальные, поплавковые, гидростатические и пьезометрические уровнемеры

Визуальные уровнемеры.

Простейшим измерителем уровня жидкости являются указательные или уровнемерные стекла (рис. 5.1). Работа указательных стекол основана на принципе сообщающихся сосудов. Гидростатическое давление в сосуде и в уровнемерной трубке равны друг другу, следовательно, уровни H и h тоже равны

$$\rho_{\text{ж}} g H = \rho_{\text{ж}} g h ,$$

где H – уровень жидкости в сосуде, h – уровень жидкости в уровнемерной трубке, $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости.

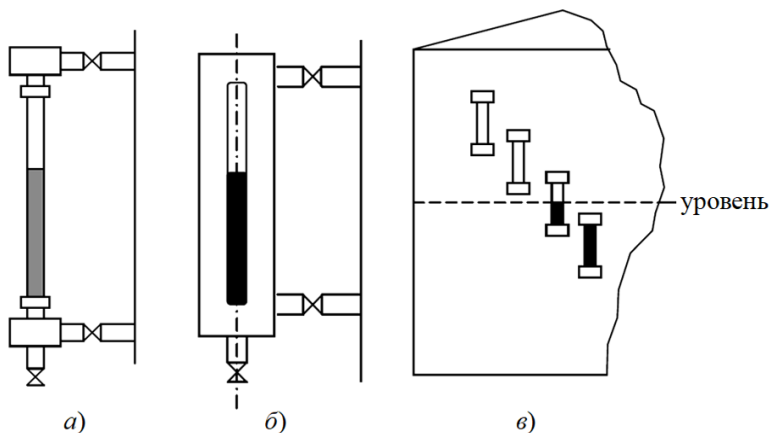


Рис. 5.1. Установка указательных стекол

Различают указательные стекла проходящего света (прозрачная стеклянная трубка, заделанная в соединительную арматуру, предназначено для небольших давлений) (рис. 5.1 *а*), отраженного света (толстое стекло, вмонтированное через прокладку в соединительную арматуру, предназначено для высоких давлений) (рис. 5.1 *б*), несколько указательных стекол (монтируются на резервуарах большой высоты (рис. 5.1 *в*). Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разряжением). Наблюдая за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в ёмкости.

Указательные стекла снабжают вентилями или кранами для отключения их от сосуда и продувки в системы. В арматуру указательных стекол сосудов, работающих под давлением, обычно вводят предохранительные устройства, автоматически закрывающие каналы в головках при случайной поломке стекла. Плоские указательные стекла рассчитаны на давление до 2,94 МПа и температуру до 300°C. Указательные стекла не рекомендуются употреблять длиной более 0,5 м, поэтому при контроле уровня, изменяющегося больше чем на 0,5 м, устанавливают несколько стекол так (рис. 5.1 *в*), чтобы верх предыдущего стекла перекрывал низ последующего.

Поплавковые уровнемеры.

Являются самыми распространенными средствами измерения уровня жидкостей (рис. 5.2). Ранее на рис. 2.23 был показан поплавковый уровнемер топлива в бензобаке автомобиля.

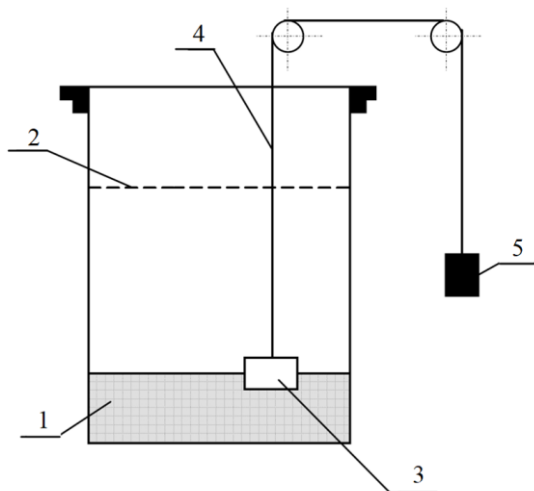


Рис. 5.2. Поплавковый уровнемер

Метод измерения уровня состоит в преобразовании линейных перемещений поплавка, находящегося на поверхности жидкости и перемещающегося при изменении ее уровня, в перемещение указателя шкалы.

Уровень контролируемой жидкости 1 может изменяться от минимального до максимального 2. Чувствительным элементом уровнемера является поплавок 3, плавающий на поверхности жидкости. Поплавок 3 подвешен на гибком тросе 4 и уравнивается грузом 5. Положение груза относительно шкалы определяет уровень жидкости. Пределы измерения устанавливают в соответствии с принятыми значениями нижнего 1 и верхнего 2 уровней.

Разновидностью поплавковых уровнемеров являются уровнемеры буйкового типа с погруженным поплавком (рис. 5.3).

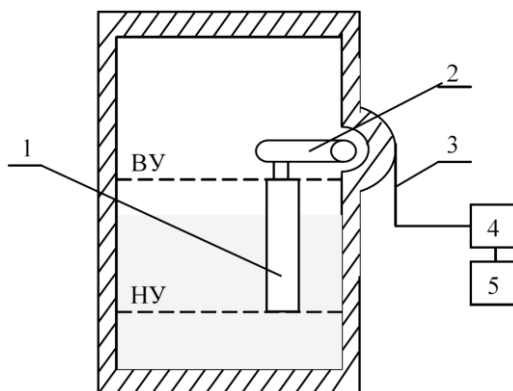


Рис. 5.3. Буйковый уровнемер

При измерении уровня жидкости по закону Архимеда за счет выталкивающей силы изменяется вес буйка G . Выталкивающая сила действующая на боек уменьшает его вес пропорционально уровню измеряемой жидкости, который измеряется специальным весоизмерительным устройством. На вход измерителя силы поступает сигнал пропорциональный

$$F = G - (\rho_b - \rho_{ж})gSh,$$

где G – вес буйка, S – площадь сечения буйка, h – глубина погружения буйка, ρ_b – плотность материала буйка, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости.

При изменении уровня жидкости от нижнего уровня НУ до верхнего уровня ВУ создается выталкивающая сила, действующая на боек 1 и на рычаг 2. Соответственно изменяется момент сил, который передается через вал 3 на весоизмерительное устройство 4, а далее на вторичный прибор 5, отградуированный в единицах уровня жидкости.

Буйковые измерители уровня, как правило, используются в системах автоматического регулирования, защиты и сигнализации.

Гидростатические уровнемеры.

В гидростатических измерителях уровня жидкости измеряется непосредственно гидростатическое давление, и применяются для этого, как правило, дифференциальные манометры, которые позволяют измерять уровень по перепаду давления внизу ёмкости и в уравнительном сосуде. Такие уровнемеры применяют в открытых и закрытых сосудах, т. е. в сосудах, находящихся под давлением и разрежением.

При измерении уровня гидростатическое давление на дне ёмкости P_c в которой измеряется уровень определяется

$$P_c = \rho_{ж} gh + P_a,$$

где h – уровень жидкости, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, P_a – давление над жидкостью.

На рис. 5.4 показана схема трубных соединений при измерении уровня в открытой ёмкости (рис. 5.4 а) и ёмкости находящейся под давлением (рис. 5.4 б) с установкой дифманометра ниже дна измеряемой ёмкости.

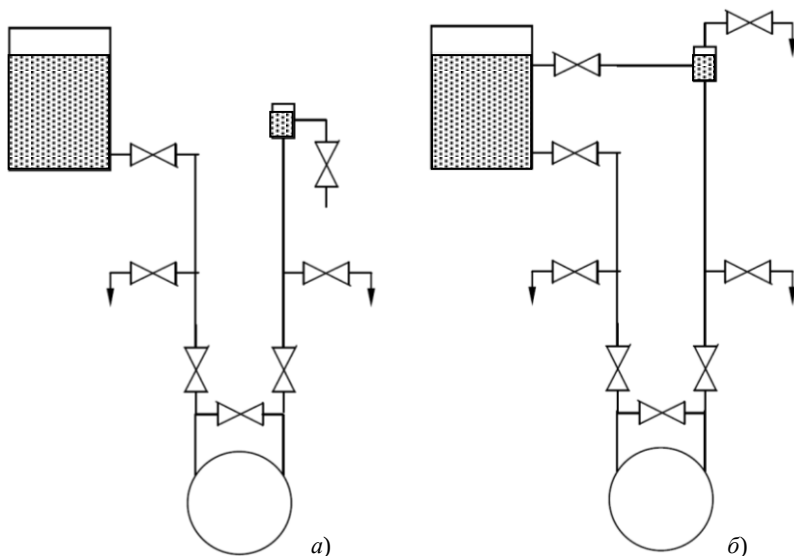


Рис. 5.4. Схема трубных соединений ёмкости и дифманометра

При применении дифманометров для измерения уровня обязательно устанавливают уравнительный сосуд, наполненный до определенного уровня той же жидкостью, что находится в ёмкости. Назначение уравни-

тельного сосуда – обеспечение постоянного столба жидкости в одном из колен дифманометра. Высота столба жидкости во втором колене дифманометра изменяется с изменением уровня в ёмкости. Каждому значению уровня в ёмкости соответствует определенный перепад давления, показываемый дифманометром, что позволяет судить о положении уровня в ёмкости.

Еще одной разновидностью гидростатических уровнемеров являются *пьезометрические уровнемеры*. Они используют принцип гидравлического затвора, устанавливающего предельное давление в пневматической системе (рис. 5.5).

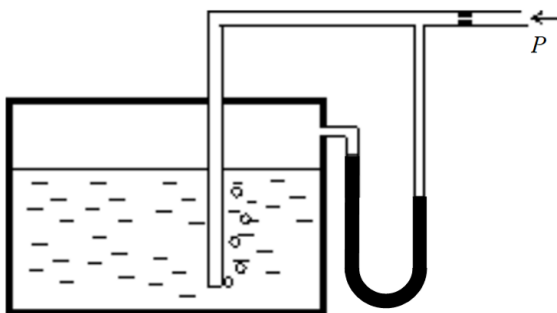


Рис. 5.5. Пьезометрический уровнемер

Для измерения уровня h используется воздух, который под давлением барботируют (продувают с выделением пузырьков) через пьезометрическую трубку и слой жидкости с минимально возможным расходом. Расход продуваемого газа ограничивают диафрагмой или редуктором давления. Это уменьшает сопротивление в пьезометрической трубке и соответственно уменьшает погрешность измерения.

Уровень h определяется по установившемуся давлению в системе.

$$h = \frac{P_z - P_a}{\rho_{ж} g},$$

где P_z – установившееся давление в пневматической системе, равное гидростатическому, P_a – давление над поверхностью жидкости, чаще атмосферное.

Давление P_z в случае открытой, соединенной с атмосферой поверхности над жидкостью измеряют манометром, а в случае закрытой ёмкости с жидкостью измеряют перепад давления $P_z - P_a$ с помощью U-образного или дифференциального манометра.

Применяют пьезометрические уровнемеры для измерения уровня самых разнообразных, в том числе вязких и агрессивных жидкостей.

Современной разновидностью гидростатических уровнемеров являются *погружные гидростатические уровнемеры*, представляющие собой гидростатические датчики с тензорезистивным, пьезорезистивным кремниевым или ёмкостным тензометрическим чувствительным элементом, непрерывно преобразующим величину гидростатического давления в электрический сигнал, пропорциональный в однородной жидкой среде высоте столба жидкости над датчиком. Погружные гидростатические уровнемеры надёжно работают в труднодоступных местах и скважинах на большой глубине, в том числе в агрессивных средах. Кроме того, гидростатические погружные уровнемеры часто обладают большим количеством функций, часто оснащаются дополнительными опциями, например, датчиком температуры или адаптером сточных вод. Для обеспечения точности измерения турбулентных вод, датчики погружаются в вертикальную трубу. Этот способ действует при использовании уровнемеров в открытой воде.

Общий вид двух типов погружных гидростатических уровнемеров показан на рис. 5.6.



Рис. 5.6. Погружные гидростатические уровнемеры

В датчиках с тензорезистивным первичным преобразователем на упругую мембрану измерительного (чувствительного) элемента смонтированы четыре тензорезистора, включенные в мостовую схему. При деформации мембраны под действием давления происходит изменение величины их сопротивления и, следовательно, разбалансировка мостовой схемы. Сигнал разбалансировки преобразуется электронной схемой, смонтированной в датчик в электрический сигнал унифицированного вида, цифровой или аналоговый. В датчиках с ёмкостным чувствительным элементом используется принцип, заключающийся в изменении ёмкости элементов первичного преобразователя при деформации мембраны. В отдельных случаях электронная схема выполняет дополнительные функции: линеаризации сигнала первичного преобразователя, термокомпенсации для снижения влияния температуры среды на результат измерения и пр.

Типовыми характеристиками погружных гидростатических уровнемеров являются:

- основная погрешность, 0,2...0,5%;
- рабочая температура, $-20...+75^{\circ}\text{C}$;
- длина кабеля, 25...40 м;
- напряжение питания, 12...36 В;
- тип выхода, 4...20 мА/2-х пров.

В качестве опции погружной гидростатический датчик может быть снабжен термометром Pt100 для контроля температуры среды измерения. В подводящий кабель датчика встроена воздушная капиллярная трубка для соединения внутренней полости датчика с атмосферой и, тем самым, компенсации влияния атмосферного давления на результаты измерений.

5.3. Электроконтактные, емкостные и радиоволновые уровнемеры

Электроконтактные, кодуктометрические или омические уровнемеры. Принцип действия базируется на использовании электрических свойств измеряемой среды, в частности ее электропроводности. Применяются при работе с электропроводящими жидкостями проводимостью 0,2 См/м и более. На рис. 5.7 схематично представлены устройства, реализующие электрический метод измерения.

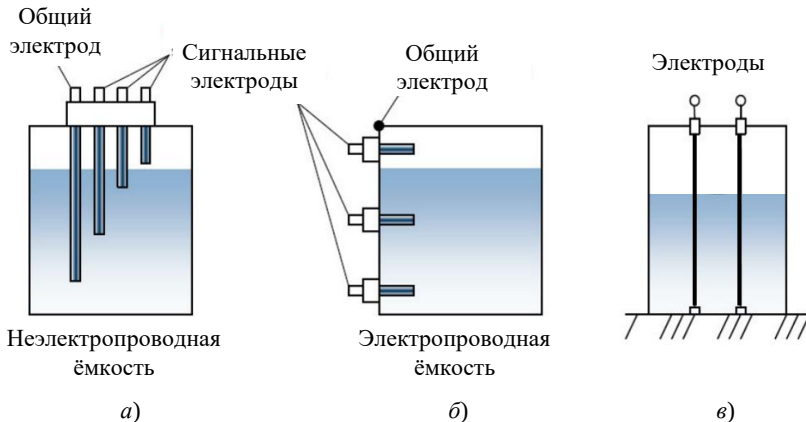


Рис. 5.7. Электроконтактные *а)*, *б)* и кондуктометрический *в)* уровнемеры

В электроконтактном или омическом уровнемере имеются один общий и несколько сигнальных электродов, установленных на необходимых отметках уровня жидкости. При измерении уровня жидкости в неэлектропроводной ёмкости из изоляционного материала (рис. 5.7 *а)* устанавлива-

ется общий электрод, а в электропроводной металлической ёмкости (рис. 5.7 б) общим электродом является сама ёмкость (резервуар) с жидкостью. При достижении жидкостью определенного электрода, электрическая цепь замыкается, и срабатывают определенные сигнализирующие или управляющие устройства, например отключающие насос. Успешно применяется при измерении уровня пенящихся продуктов.

Кондуктометрические уровнемеры.

Принцип действия базируется на измерении электрической проводимости или сопротивления первичного преобразователя, зависящего от значения уровня жидкости. Конструктивно представляет собой два электрода погруженных в жидкость на всю глубину сосуда, в котором измеряется уровень (рис. 5.7 в). Между этими электродами измеряется электрическое сопротивление или проводимость, которая преобразуется в значения уровня жидкости. Главным условием применения метода и устройства является постоянство электропроводных параметров во времени и независимость от температуры.

Ёмкостные уровнемеры.

Принцип действия основан на различии диэлектрической проницаемости водных растворов солей, кислот, щелочей или органических жидкостей от диэлектрической проницаемости воздуха или водяных паров. Ёмкостной первичный измерительный преобразователь представляет собой электрод, расположенный в вертикальной металлической трубке и образующий конденсатор. С изменением уровня жидкости изменяется степень заполнения преобразователя жидкостью или глубина его погружения и изменяется ёмкость образованного этими электродами конденсатора. При изменении глубины погружения от минимального до максимума уровня диэлектрическая проницаемость будет изменяться от диэлектрической проницаемости воздуха до диэлектрической проницаемости жидкости.

Конструктивно ёмкостные уровнемеры могут быть выполнены в различных вариантах и отличаются для электропроводных и неэлектропроводных жидкостей. Для неэлектропроводных жидкостей, это, как правило, органические жидкости, бензин, дизтопливо, у которых удельное сопротивление больше 100 Ом·м и диэлектрическая проницаемость меньше 7 применяют ёмкостные уровнемеры с неизолированными электродами. В случае электропроводных жидкостей, это растворы солей и кислот, применяют ёмкостные уровнемеры с изолированными электродами, причем изолироваться может и один из электродов. Электроды могут быть различной конструкции, как в виде параллельно расположенных пластин, так и коаксиальных цилиндров, как в уровнемере топлива, рис 2.27. Такие электроды предпочтительнее ввиду их технологичности и лучшей защищенности от повреждения и внешних электромагнитных помех.

На рис. 5.8 представлена схема емкостного первичного измерительного преобразователя для измерения уровня неэлектропроводных жидкостей. Электроды 1 и 2 образуют цилиндрический конденсатор составленный из двух коаксиально расположенных труб диаметром d_1 и d_2 . Электроды в верхней части закреплены изолятором 4 и надежно заизолированы от корпуса. Электроды помещены в сосуд 3 с жидкостью, уровень которой требуется измерять. Общая высота электродов H . Нижняя часть электродов погружена в жидкость на глубину h и образует эквивалентную ёмкость C_1 пропорциональную уровню h и диэлектрической проницаемости жидкости $\epsilon_{ж}$. Верхняя часть электродов высотой $H - h$ заполнена воздухом и парами этой жидкости, и образует эквивалентную ёмкость C_2 .

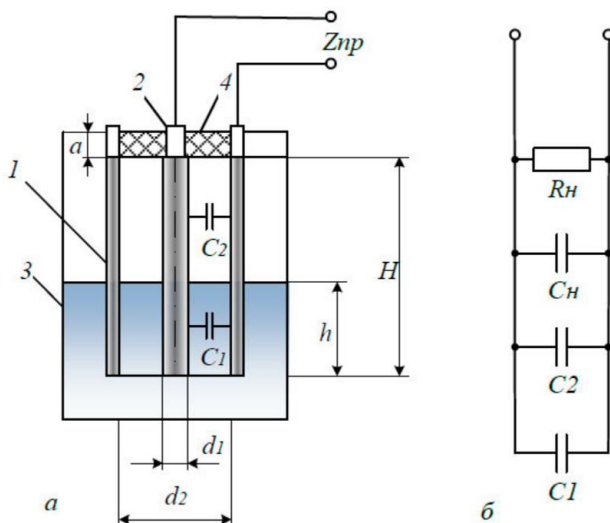


Рис. 5.8. Емкостной уровнемер и его эквивалентная схема

Ёмкости C_1 и C_2 для участков цилиндрического конденсаторного преобразователя находящихся в жидкости и в воздухе определяются выражениями:

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ж}h}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}, \quad C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_z(H-h)}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)},$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, $\epsilon_{ж}$ – диэлектрическая проницаемость жидкости, ϵ_z – диэлектрическая проницаемость газа над жидкостью и воздуха, H – высота емкостного преобразователя.

зователя, d_1 , d_2 – диаметры внутреннего и наружного электродов преобразователя.

Таким образом, общая ёмкость преобразователя C_{np} будет определяться как сумма емкостей C_1 , C_2 и ёмкости изолятора, подводящих проводов и ёмкости входных цепей измерительной схемы C_n , а также их сопротивлением R_n

$$C_{np} = C_1 + C_2 + C_n.$$

Окончательно учитывая, что диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_r = 1$, имеем ёмкость преобразователя, которая является функцией измеряемого уровня жидкости h

$$C_{np} = C_n + \frac{2\pi\epsilon_0 H}{\ln\left(d_2/d_1\right)} \left(1 + (\epsilon_{жс} - 1) \frac{h}{H}\right).$$

Электрической схемой преобразующей ёмкость преобразователя в стандартный сигнал, ток или напряжений являются мосты переменного тока, емкостные или трансформаторные, устанавливаемые как правило, вместе с электронной схемой усиления и детектирования вблизи к емкостному преобразователю уровня.

Достоинством емкостных уровнемеров является: простая конструкция; высокая точность порядка 0,1...0,2 %; широкий диапазон применяемых для измерения жидкостей; возможность использования для измерения уровня раздела сред; невысокая стоимость; высокая чувствительность.

К недостаткам следует отнести зависимость от электрических свойств жидкостей, их состава, концентрации, температуры и т.д.

Радиоволновые, радарные уровнемеры

Предназначены для бесконтактного измерения и сигнализации уровня жидкости и сыпучих материалов путем облучения контролируемой среды радиоволнами (рис. 5.9). Радарные уровнемеры являются одной из самых современных разработок для бесконтактного измерения уровня и не имеют ограничений в плане вида контролируемой поверхности, т.е. подходят для жидкостей любой вязкости и проводимости, сыпучих материалов любого размера фракции, пенящихся сред и т.д. Подходят для работы открытых бункерах и резервуарах.

Принцип действия заключается в излучении в направлении контролируемой поверхности микроволновых импульсов с помощью рупорной СВЧ антенны (рис. 5.9 а) и приёма отраженного сигнала. В результате обработки электронной схемой параметров отраженной радиоволны выделяется сигнал, пропорциональный расстоянию H от датчика до поверхности, а затем микропроцессорной системой вычисляется уровень L .

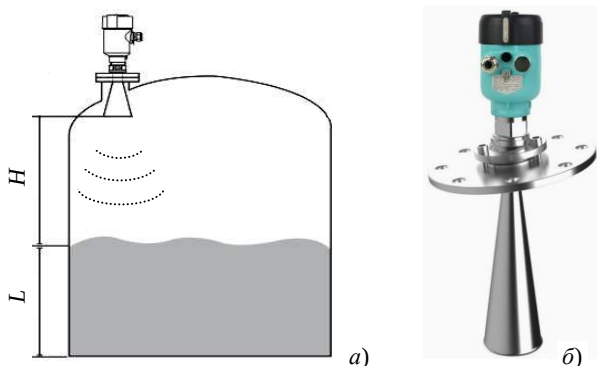


Рис. 5.9. Радиоволновый уровнемер

Достоинства уровнемеров: надежность, температурная стабильность, простота монтажа и настройки, отсутствие контакта с измеряемым продуктом, компактность и т.д. Погрешность измерения от 3 до 15 мм в зависимости от диапазона частот и размера фракций сыпучего материала.

5.4. Измерение уровня сыпучих материалов

Электрические, емкостные и поплавковые методы измерения уровня сыпучих материалов и устройства имеют ту же физическую основу, что и методы измерения уровня жидкостей.

В основу *маятникового уровнемера* положен принцип отклонения сыпучим материалом маятника, выполняющего роль чувствительного элемента. На рис. 5.10 представлена схема устройства, реализующего маятниковый метод измерения.

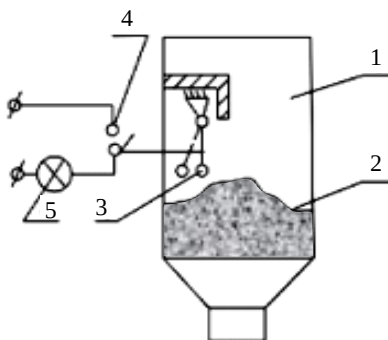


Рис. 5.10. Маятниковый уровнемер

В бункере 1, куда насыпается сверху сыпучий материал 2, при достижении поверхности сыпучего материала маятника 3, расположенного на предельном уровне, он отклоняется естественным углом откоса, замыкая ключ 4, в результате чего замыкается цепь и включается сигнальное устройство 5.

Разновидностью маятникового метода является *вибрационный уровнемер* (рис. 5.11 а). Основным элементом уровнемера является вибрирующий элемент (вибровилка-камертон) (рис. 5.11 б), который приводится в действие пьезоэлектрическим устройством и вибрирует на своей резонансной частоте. При достижении уровня сыпучего материала вибровилки или погружении в него частота колебаний и амплитуда вибрирующего элемента изменяются. Это изменение частоты фиксируется встроенным генератором и преобразуется в выходной сигнал. Благодаря механически прочной конструкции вибровилки на её работу не оказывают влияния химические или физические свойства сыпучего материала. Вибровилка может работать в условиях сильных внешних вибраций и пригодна для широкого ассортимента сыпучих материалов. Стандартным применением вибрационных уровнемеров является сигнализация о переполнении бункера. Монтируется как в верхней части загружаемого бункера, так и в боковой поверхности бункера для контроля промежуточных состояний уровня.

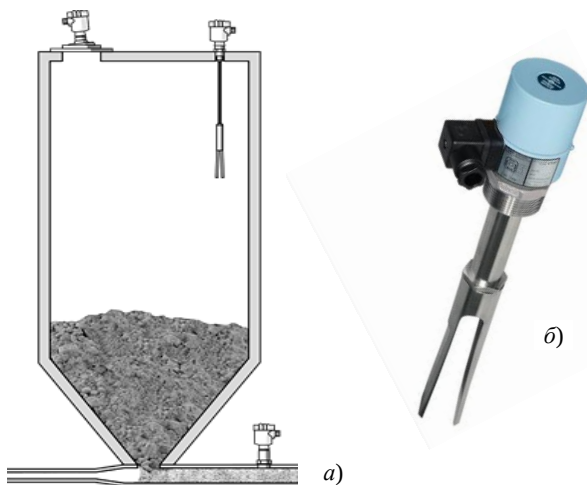


Рис. 5.11. Вибрационный уровнемер а) и вибрирующий элемент б)

Весовые уровнемеры или измерители массы сыпучего материала в бункере работают на весоизмерительном принципе. На рис. 5.12 представлена схема весового уровнемера.

Основой устройства является бункер 1, который устанавливается на две опоры. Одна опора имеет возможность качаться в небольших пределах, другая опора является измерительным преобразователем и представляет собой мессдозу 2. Мессдоза имеет металлический кожух с закрепленной в нем металлической мембраной. Нижняя часть мессдозы заполнена жидкостью и соединена трубкой с манометром 3. Измеряемое манометром давление в мессдозе равно половине веса бункера с находящимся в нем сыпучим материалом, делённой на площадь мембраны. В результате показания манометра при соответствующей градуировке и установке на ноль при пустом бункере будут показывать вес сыпучего материала в нем или его уровень. Причем конфигурация сыпучего материала не имеет значения. Это может быть песок, цемент или крупные камни. Достоинством весового уровнемера является отсутствие внутри бункера каких-либо измерительных преобразователей, датчиков и прочее, а недостатком – невысокая точность измерения, погрешность достигает 10%.

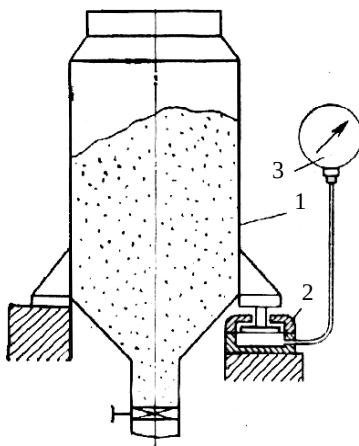


Рис. 5.12. Весовой уровнемер

В современных весовых уровнемерах вместо мессдозы применяют более совершенные магнитоупругие преобразователи, которые обеспечивают более высокую точность измерения. Для преобразования силы тяжести бункера с заполняющим его материалом в электрический сигнал магнитоупругие преобразователи устанавливают под всеми его опорами. Действие этих преобразователей основано на изменении магнитной проницаемости стальной пластины преобразователя при упругой механической деформации.

5.5. Вопросы для самостоятельной работы

1. Перечислите методы и устройства измерения уровня жидких веществ. Какова их физическая основа?
2. В чем состоит сущность визуального уровнемера? Каковы их разновидности?
3. Как устроен поплавковый уровнемер?
4. Как устроен буйковый уровнемер? Связь с законом Архимеда.
5. Поясните физическую основу гидростатического уровнемера жидкостей.
6. Учитывается ли в основном уравнении гидростатики влияние давления над контролируемой жидкостью?
7. В чем заключается пьезометрический метод измерения уровня?
8. Как реализуется пьезометрический метод измерения уровня?
9. Что из себя представляют погружные гидростатические уровнемеры?
10. Какова физическая основа электрических уровнемеров?
11. Как устроен электроконтактный уровнемер?
12. Как устроен емкостной уровнемер?
13. Перечислите методы и устройства измерения уровня сыпучих материалов.
14. Какова особенность маятникового и вибрационного метода измерения уровня сыпучих материалов?
15. В чем состоит сущность весового уровнемера?

6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗА

6.1. Элементы механики жидкостей. Измерение расхода

Движение жидкости называется *течением*, а совокупность частиц движущейся жидкости – *потоком*.

При установившемся движении несжимаемой идеальной жидкости выполняется закон сохранения энергии, который описывается **уравнением Бернулли**

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const},$$

где v – скорость потока жидкости, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; первое слагаемое – кинетическая энергия единицы объёма движущейся жидкости, Дж/м³; ρgh – потенциальная энергия жидкости в поле тяжести; p – потенциальная энергия сил давления, Дж/м³.

При течении реальной жидкости между движущимися слоями возникают *силы внутреннего трения*, оказывающие сопротивление перемещению слоёв, которые определяют *вязкость* жидкости. Если скорость v зависит от времени t , то течение жидкости называется *нестационарным*, если она не зависит от времени, течение называют *стационарным*.

Для несжимаемых жидкостей выполняется **уравнение неразрывности**

$$S_1 v_1 = S_2 v_2,$$

т.е. *при стационарном течении несжимаемой жидкости объёмный расход жидкости в каждом сечении трубки тока одинаков*.

Расход это количество вещества Q , проходящее через поперечное сечение трубопровода S в единицу времени t .

$$Q = S \cdot v$$

В зависимости от единиц измерения количества жидкости расход может быть объёмным Q (в м³/с) или массовым $G = Q \cdot \rho$ (в кг/с).

Приборы, предназначенные для измерения расхода вещества в единицу времени, называют *расходомерами*. В расходомере может быть счетчик или интегратор для суммирования массы или объема вещества за некоторый временной интервал.

В зависимости от реализуемого принципа действия средства измерения расхода можно разделить на следующие:

- расходомеры переменного перепада давления, принцип действия которых основан на зависимости от расхода вещества перепада давления, создаваемого на гидравлическом сопротивлении, представляющем собой неподвижное устройство, устанавливаемое в трубопроводе;

– расходомеры постоянного перепада давления, основанные на зависимости вертикального перемещения поплавка в конической трубе от расхода вещества, при котором перепад давления перед и после поплавка остается постоянным;

– тахометрические расходомеры (турбинные с аксиальной или тангенциальной турбиной; шариковые), преобразующие скорость потока в угловую скорость вращения обтекаемого элемента (лопастей турбинки или шарика)

– электромагнитные или индукционные расходомеры, принцип действия которых основан на измерении ЭДС, возникающей при движении электропроводной жидкости в магнитном поле;

– вихревые расходомеры, основанные на зависимости частоты срыва вихрей за телом обтекания от скорости потока;

– ультразвуковые расходомеры, основанные на измерении разности времени распространения ультразвуковых импульсов навстречу и по течению потока вещества.

6.2. Расходомеры переменного перепада давления

Принцип измерения основан на законе сохранения энергии потока и заключается в том, что разность давлений в сужающем устройстве зависит от количества проходящего по трубопроводу вещества и служит мерой его расхода. Для измерения перепада давления в сужающем устройстве используют дифманометры. В качестве сужающего устройства применяют диафрагмы, сопла, трубу и сопло Вентури и пр.

Допустим, что в трубопроводе круглого сечения установлено простейшее сужающее устройство в форме диафрагмы с цилиндрическим отверстием, центр которого совпадает с осью трубопровода (рис. 6.1).

Площадь сечения потока уменьшается при приближении к диафрагме, при этом скорость потока возрастает и соответственно уменьшается статическое давление. Наибольшее сужение потока наблюдается в сечении 2 после диафрагмы. Перед диафрагмой у стенок трубопровода возникает скачек давления. После сечения 2 скорость потока постепенно увеличивается и к сечению 3 становится равной (в идеальном случае) скорости в сечении 1. Однако статическое давление полностью не восстанавливается за счет потерь на завихрение потока. Разность давлений P_n называют *потерей напора*.

Геометрически поток характеризуется тремя площадями: сечением трубопровода $S_1 = \frac{\pi D^2}{4}$, проходным сечением диафрагмы $S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$ и сечением наиболее узкой части потока S_n .

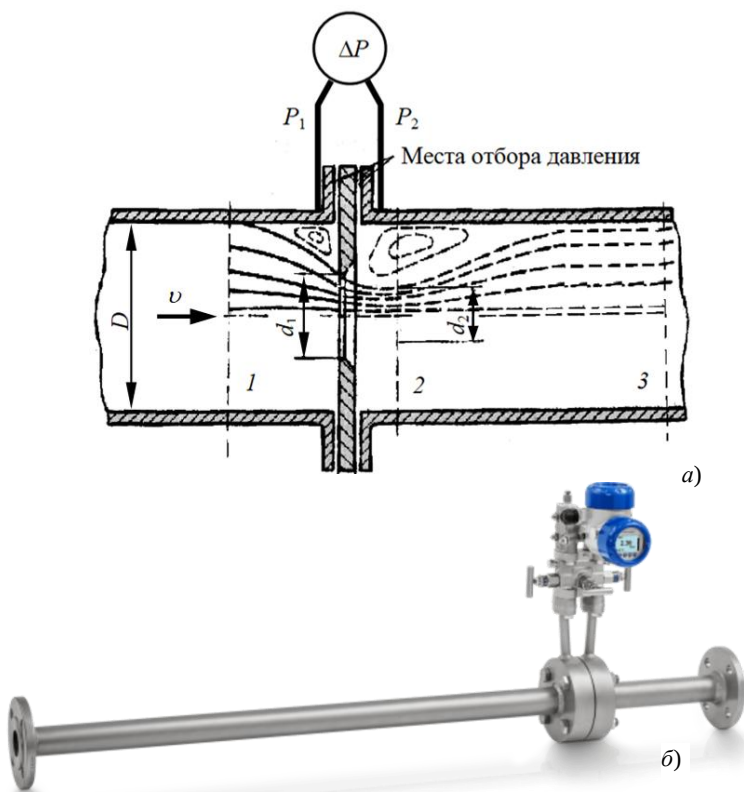


Рис. 6.1. Расходомеры переменного перепада давления:
 а) – устройство с диафрагмой в качестве сужающего устройства,
 б) – общий вид

Отношение площадей $\frac{S_0}{S_1} = \frac{d^2}{D^2} = m$ называют *модулем сужающего устройства*.

Для сечений потока 1 и 2, в которых статические давления P_1 и P_2 постоянны по всему сечению, по уравнению Бернулли имеем

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2},$$

а по уравнению неразрывности струй имеем $\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2$,

где S_1 и S_2 – площади сечений 1 и 2; v_1 и v_2 – скорости потока в сечениях 1 и 2; ρ_1 и ρ_2 – плотности потока в сечениях 1 и 2.

Для идеальной несжимаемой жидкости можно принять, что $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Сечение S_2 измерять практически трудно, поэтому удобнее выразить его через сечение S_0 , вводя коэффициент сужения струи после сужающего устройства, т.е. $S_2 = \mu S_0$. Тогда уравнению неразрывности примет вид

$$v_1 S_1 = \mu v_2 S_0.$$

Учитывая, что $\frac{S_0}{S_1} = m$, скорость потока в сечении 1 равна $v_1 = \mu m v_2$.

Подставляя полученное выражение для скорости в уравнение Бернулли, получим скорость в наиболее узком сечении 2 идеального потока

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}.$$

Зависимость между скоростью и перепадом давления необязательно определять по падению давления в месте наибольшего сужения струи. Можно определять скорость потока по давлению в сечении 3 по потере напора или по перепаду давления $\Delta P = P_1 - P_2$ непосредственно до и после диафрагмы.

Для того чтобы определять расход по перепаду давления ΔP непосредственно у сужающего устройства, необходимо ввести поправочный коэффициент ξ , учитывающий влияние сил вязкого трения. В этом случае из уравнения для действительной скорости в сечении 2 реальной жидкости с учетом поправочного коэффициента нетрудно перейти к объемному расходу жидкости

$$Q = S_0 \frac{\mu \xi}{\sqrt{1 - \mu^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$$

или к массовому расходу $G = Q \cdot \rho$.

Так как места отбора наибольшего перепада давления ΔP находятся с двух сторон сужающего устройства (см. рис. 6.1 а), расход вещества, с учетом реальных значений поправочного коэффициента ξ , модуля сужающего устройства m и коэффициента сужения струи после сужающего устройства μ , рассчитывают по формуле

$$Q = 1,11 \cdot \alpha \varepsilon d_1^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}},$$

где α – коэффициент расхода; ε – коэффициент расширения; d_1 – диаметр отверстия сужающего устройства.

Таким образом, получено выражение расхода жидкости в зависимости от перепада давления, которое обычно измеряют дифманометром, установленном непосредственно на трубопроводе вблизи сужающего уст-

ройства (см. рис. 6.1 б). Эта зависимость является обратной квадратичной, которую учитывают при градуировке расходомера.

6.3. Расходомеры постоянного перепада давления

Представляют собой *расходомеры обтекания* или *ротаметры*, которые предназначены для измерения объемного расхода плавно меняющихся однородных потоков чистых или слабозагрязненных жидкостей и газов с дисперсными включениями.

Принцип действия ротаметров (стеклянных и металлических) основан на восприятии динамического напора потока измеряемой среды чувствительным элементом ротаметра – поплавком, помещенным в коническую трубу, по которой вверх проходит поток измеряемой среды. В ротаметрах измеряется величина перемещения поплавка h внутри трубы пропорциональная расходу жидкости Q проходящей через ротаметр.

Ротаметры стеклянные (рис. 6.2) для местного измерения расхода конструктивно представляют собой вертикальную стеклянную трубу конического сечения 1, вмонтированную в корпус расширяющимся концом вверх. Внутри трубы 1 находится поплавок 2, перемещаемый вертикально восходящим потоком жидкости или газа. Шкала прибора условная, в процентах, нанесена непосредственно на стеклянной трубке. Отсчет показаний прибора производят по верхней острой кромке поплавка.

При изменении положения поплавка проходное сечение между ним и внутренней стенкой конической трубы изменяется, что ведет к изменению скорости потока в проходном сечении, а, следовательно, к изменению перепада давления на поплавке.

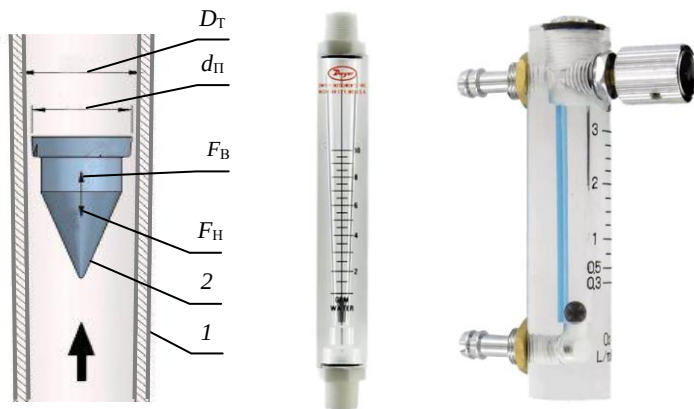


Рис. 6.2. Ротаметры с конической трубкой

Перемещение поплавка происходит до тех пор, пока перепад давлений не станет равным массе поплавка, приходящейся на единицу площади его поперечного сечения.

На поплавок ротаметра сверху вниз действуют две силы: сила тяжести и сила образуемая давлением потока на верхнюю плоскость поплавка.

Сила тяжести поплавка определяется в соответствии с уравнением

$$F_{\Pi} = V\rho_{\Pi}g,$$

где V – объем поплавка; g – ускорение свободного падения; ρ_{Π} – плотность материала поплавка.

Сила, образуемая давлением потока на верхнюю плоскость поплавка, равна

$$F_{\Pi.в} = P'_2 S,$$

где P'_2 – среднее давление потока на единицу верхней плоскости поплавка; $S = \pi d_{\Pi}^2/4$ – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка.

Суммарно эти две силы будут действовать вниз, обозначим её

$$F_{\Pi} = F_{\Pi} + F_{\Pi.в}.$$

Снизу вверх на поплавок действуют также две силы: сила, образуемая давлением потока на нижнюю плоскость поплавка

$$F_{\Pi.н} = P'_1 S,$$

где P'_1 – среднее давление потока на единицу нижней плоскости поплавка; и сила трения потока о поплавок

$$F_{\text{тр}} = k\nu_{\kappa}^n S_{\delta},$$

где k – коэффициент сопротивления, зависящий от шероховатости поверхности трубы и числа Рейнольдса; ν_{κ} – средняя скорость потока в кольцевом канале, охватывающем боковую поверхность поплавка; S_{δ} – площадь боковой поверхности поплавка; n – показатель, зависящий от величины скорости.

Суммарно эти две силы будут действовать вверх, обозначим её

$$F_{\text{в}} = F_{\Pi.н} + F_{\text{тр}}.$$

Условие равновесия поплавка $F_{\Pi} = F_{\text{в}}$ или $F_{\Pi} + F_{\Pi.в} - F_{\Pi.н} - F_{\text{тр}} = 0$, откуда для разности давлений получим выражение

$$P'_1 - P'_2 = \frac{V\rho_{\Pi}g}{S} - \frac{k\nu_{\kappa}^n S_{\delta}}{S}. \quad (6.1)$$

Если ν_{κ} при всех расходах остается постоянной (с увеличением расхода поплавок поднимается в область большего диаметра конической трубы и увеличивается площадь кольцевого канала), то вся правая часть

уравнения (6.1) будет постоянной, так как остальные величины для данного прибора тоже постоянны. Следовательно, ротаметр является прибором постоянного перепада давления.

Для экспериментальной градуировки ротаметров, предназначенных для измерения расхода жидкостей или газов, в качестве градуировочной среды обычно используют воду или воздух при температуре 20°C и давлении 101 кПа. Применяя полученное выражение (6.1) в уравнении неразрывности струй, с учетом градуировочных параметров ротаметра получим выражение для расхода Q как функции высоты расположения поплавка h в трубке ротаметра

$$Q = Q_r \frac{h}{h_r} \sqrt{\frac{\rho_r(\rho_n - \rho)}{\rho(\rho_n - \rho_r)}},$$

где h – коэффициент расхода или показание ротаметра при измерении расхода реальной жидкости; h_r – показание ротаметра при градуировке; ρ – плотность измеряемой среды (реальной жидкости); ρ_r – плотность среды, при которой производилась градуировка ротаметра; ρ_n – плотность материала поплавка ротаметра.

Таким образом, основным недостатком расходомеров постоянного перепада давления является необходимость индивидуальной градуировки (у каждого ротаметра должна быть переводная градуировочная таблица) и обязательность вертикального расположения ротаметра. Тем не менее, ротаметры обладают рядом достоинств: малые потери давления (меньше 15 кПа), достаточно большой диапазон измерения (более 10:1), высокая точность (погрешность $\pm 0,5$ %), линейная шкала, простота конструкции, низкая стоимость.

6.4. Тахометрические расходомеры

Тахометрическими называются расходомеры, имеющие вращающийся элемент, скорость которого пропорциональна объемному расходу. Они подразделяются на турбинные, шариковые, роторно-шаровые и камерные.

Турбинные преобразователи расхода вещества могут быть с аксиальной (рис. 6.3 а) и с тангенциальной турбинкой (рис. 6.3 б). У аксиальной лопасти расположены по винтовой линии, а ось совпадает с осью потока. У тангенциальной ось перпендикулярна к направлению потока, а прямые лопасти расположены радиально по отношению к оси. Они преобразуют скорость потока в угловую скорость вращения обтекаемого элемента. Аксиальные турбинки встречаются чаще, чем тангенциальные. Тангенциальные применяют при небольших диаметрах труб от 10 до 50 мм и расходах от 0,15 до 12 м³/ч.

Преобразование в тахометрическом расходомере проходит в два этапа, сначала скорость движения жидкости, выражающая расход, преобразуется в скорость вращения турбинки, затем тахометр преобразовывает скорость вращения в сигнал, пропорциональный расходу, обычно в частоту электрических импульсов. Счетчики-расходомеры могут не выдавать выходной сигнал, а суммировать показание количества протекшего вещества и выводить его на механическое или электронное счетное устройство.

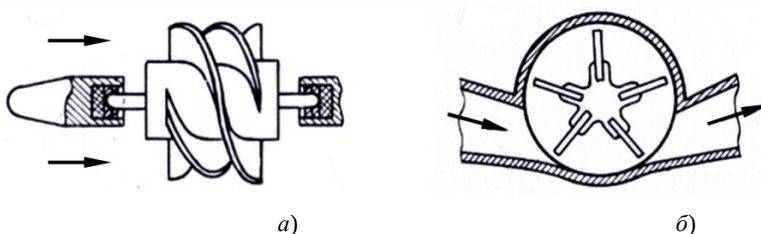


Рис. 6.3. Тахометрические расходомеры

Для аксиальной турбинки зависимость числа оборотов n в единицу времени от объемного расхода Q выражается в общем виде уравнением:

$$n = f(Q, \nu, \rho, M_{тр}, D, z, H),$$

где ν и ρ – кинематическая вязкость и плотность измеряемой жидкости; $M_{тр}$ – момент трения тахометра; D – диаметр трубопровода; z – число лопастей; H – шаг лопастей по винтовой линии.

Более точные зависимости числа оборотов от расхода могут быть получены путем решения дифференциального уравнения движения вращающихся элементов.

Турбинные тахометрические расходомеры и счетчики количества вещества изготавливаются для труб диаметром от 4 до 750 мм, для давлений до 250 МПа и температур от -240 до $+700^{\circ}\text{C}$. Турбинные расходомеры применяются преимущественно для измерения расхода и количества воды, нефтепродуктов и других жидкостей. Погрешность таких расходомеров составляет 2...5 %. В отдельных моделях погрешность турбинного расходомера существенно снижена до 0,5...1,5 % в зависимости от точности примененного частотомера.

Основной недостаток тахометрических расходомеров является износ трущихся опор, что делает их более пригодными для измерения расхода жидкостей, благодаря их смазывающей способности, чем для газов.

6.5. Электромагнитные расходомеры

Основой электромагнитных расходомеров является закон электромагнитной индукции, в соответствии с которым при движении электропроводящей жидкости в магнитном поле в ней индуцируется ЭДС.

Электромагнитный расходомер представляет собой встраиваемую в трубопровод вставку с фланцами (рис. 6.4), изготовленную из немагнитного материала, покрытую внутри неэлектропроводной изоляцией. Электроизоляционная труба помещается между полюсами магнита или электромагнита 1, в неё вводятся два электрода 2 в направлении, перпендикулярном как к направлению движения жидкости (вектора скорости потока v), так и к направлению линий магнитной индукции B . Электродвижущая сила ε между электродами 2 определяется уравнением:

$$\varepsilon = BvD,$$

где B – индукция магнитного поля, создаваемого системой электромагнитов; v – средняя скорость потока жидкости; D – расстояние между концами электродов, равное внутреннему диаметру трубопровода.

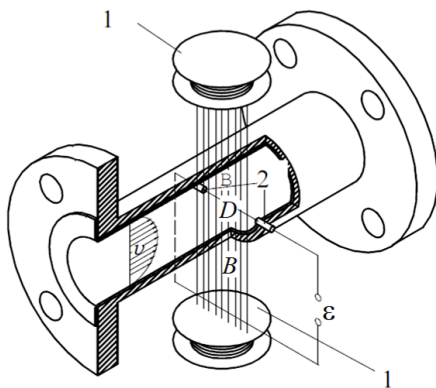


Рис. 6.4. Схема электромагнитного расходомера

С учетом объемного расхода $Q = S \cdot v$ и площади поперечного сечения трубопровода $S = \frac{\pi D^2}{4}$, аналогичное уравнение для ЭДС можно записать и для объемного расхода Q , которое принимает вид:

$$\varepsilon = Q \frac{4B}{\pi D}.$$

Для питания электромагнитов расходомера применяют как постоянный, так и переменный ток, предотвращающий поляризацию электродов.

Электромагнитные расходомеры обладают высокой точностью измерений в широком диапазоне, они не требуют больших прямолинейных участков трубопровода, их показания не зависят от вязкости и плотности измеряемого вещества. Их можно применять в трубах любого диаметра, при их работе отсутствует потеря давления. Эти расходомеры имеют линейную шкалу, обладают высоким быстродействием, имеют возможность измерять агрессивные, абразивные и вязкие жидкости. Можно измерить водопроводную воду, щелочи, кислоты и другие жидкости, применяемые в химической промышленности, соки, сиропы и разнообразные жидкости в пищевой промышленности, различные водные растворы в алюминиевой и других отраслях промышленности, сточные жидкости и т. п. С помощью особых электрических измерительных схем предел применения рассматриваемых расходомеров повышен до 10^{-5} См/м.

6.6. Ультразвуковые расходомеры

Принцип действия ультразвуковых расходомеров основан на время-импульсном, частотно-импульсном, доплеровском и фазовом методе измерения расхода.

При реализации времяимпульсного метода ультразвуковые импульсы поочередно передаются вверх и вниз по течению потока. Разность времен распространения пропорциональна скорости течения потока. Этот метод успешно применяется для определения расхода жидкостей, природного, факельного и других газов, а также для определения массового расхода, энергии тепловых потоков и анализа бинарных газовых смесей.

Схематично ультразвуковой расходомер показан на рис 6.5, в состав которого входят два первичных ультразвуковых преобразователя расхода, состоящих из двух пар пьезоэлектрических преобразователей ПЭП1 и ПЭП2, установленных на трубопроводе под углом α к потоку и вторичный преобразователь – электронный блок.

Пьезоэлектрические преобразователи работают попеременно в режиме приемник–излучатель.

В прямом цикле измерения пьезоэлектрический преобразователь ПЭП1 под действием электрического возбуждения излучает плоскую ультразвуковую волну. Эта волна проходит сквозь поток жидкости и принимается приемным пьезоэлектрическим преобразователем ПЭП2, который преобразует полученные акустические колебания в электрические сигналы. Расходомер анализирует принятый сигнал и регистрирует время прохождения акустической волны от излучающего до приемного преобразователя.

В обратном цикле последовательность передачи – приема сигнала предыдущего цикла повторяется, но функции излучающего и приемного

преобразователей меняются местами. Таким образом, теперь поток жидкости пересекает ультразвуковую волну в противоположном направлении. Расходомер снова регистрирует время прохождения импульса.

Поток материала будет влиять на измеренное время прохождения сигнала точно так же, как течение воды влияет на скорость пловца "подталкивая" или "тормозя" его. Расходомер вычитает время прохождения обратного цикла из времени прохождения прямого цикла, и, полученная в результате разность сигналов будет пропорциональна потоку движущейся жидкости.

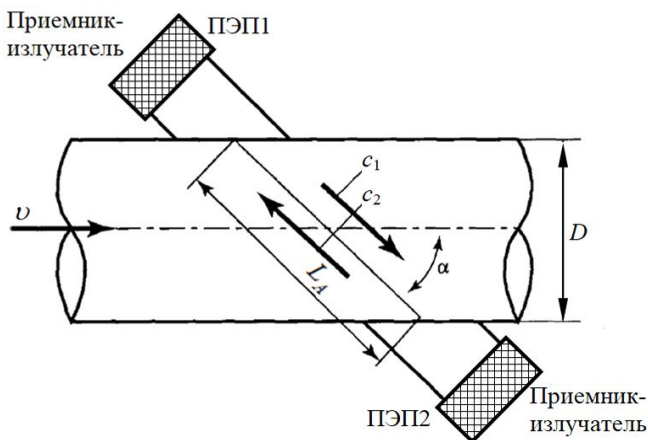


Рис. 6.5. Схема ультразвукового расходомера

Скорость распространения ультразвукового сигнала в воде c_1 , c_2 , заполняющей трубопровод, представляет собой сумму скоростей ультразвука в неподвижной воде c_0 и скорости потока воды v в проекции на рассматриваемое направление распространения ультразвука, тогда

$c_1 = c_0 + v \cos \alpha$ – скорость ультразвука по направлению потока воды,

$c_2 = c_0 - v \cos \alpha$ – скорость ультразвука навстречу потоку воды.

Время распространения ультразвукового импульса от ПЭП1 к ПЭП2 и от ПЭП2 к ПЭП1 зависит от скорости движения воды и определяется формулами

$$t_1 = \frac{L_A}{c_0 + v \cos \alpha}, \quad t_2 = \frac{L_A}{c_0 - v \cos \alpha},$$

где t_1 , t_2 – время распространения ультразвукового импульса по потоку и против потока; L_A – длина активной части акустического канала; c_0 – скорость ультразвука в неподвижной воде; v – скорость движения воды в

трубопроводе; α – угол между вектором скорости потока и вектором ультразвукового сигнала.

Разность времени распространения ультразвуковых импульсов по потоку и против потока определяется из измеренных значений $\Delta t = t_2 - t_1$.

Тогда скорость потока измеряемой жидкости определяется как

$$v = \frac{\Delta t c_0^2}{2L_A \cos \alpha}.$$

Умножив среднюю скорость потока v на сечение трубопровода S , получим уравнение для определения значения расхода жидкости в трубе

$$Q = K \frac{\pi D^2}{4} \frac{\Delta t c_0^2}{2L_A \cos \alpha},$$

где D – внутренний диаметр трубопровода на месте установки ПЭП; K – коэффициент коррекции, учитывающий особенности расходомера.

Основной недостаток и источник погрешности ультразвуковых расходомеров является осреднение скорости потока жидкости по площади сечения трубопровода. Тем не менее, погрешность ультразвуковых расходомеров для измерения расхода природного газа составляет 0,4%.

6.7. Вопросы для самостоятельной работы

1. Что называют расходом вещества?
2. Назовите единицу измерения объемного и массового расхода.
3. По какому принципу разделяют приборы для измерения расхода?
4. В чем состоит принцип действия расходомеров переменного перепада давления?
5. Как зависит перепад давления в сужающем устройстве от расхода?
6. Приведите расчетную зависимость расхода от перепада давления.
7. Поясните принцип действия ротаметра с конической трубкой.
8. Приведите расчетную зависимость расхода от положения поплавка.
9. Поясните принцип действия и устройство тахометрических расходомеров.
10. Поясните принцип действия и устройство электромагнитных расходомеров.
11. Приведите расчетную зависимость расхода от ЭДС.
12. Поясните принцип действия и устройство ультразвуковых расходомеров.
13. Какие устройства входят в комплект ультразвуковых расходомеров?

7. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

7.1. Использование в измерительной технике законов термодинамики

Температура – это физическая величина, количественно характеризующая меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества. Если привести в контакт два тела при различных температурах, то более нагретое тело (с более высокой температурой) будет охлаждаться, а менее нагретое – нагреваться. Процесс теплопередачи и изменения температур тел будет продолжаться до тех пор, пока их температуры не станут равными, т. е. наступит тепловое или термодинамическое равновесие. Подобный процесс наблюдается в том случае, если оба тела в тепловом отношении изолированы от окружающей среды и не наблюдается приток извне тепла или же потери тепла в среду.

Температура определяет внутреннюю энергию тела: потенциальная и кинетическая энергии молекул газа, жидкости или твердого тела зависят от температуры. Энергия отдельно взятой молекулы не совпадает со средней энергией тела, поэтому понятие температуры к молекуле неприменимо. Следовательно, понятие температуры является статистическим и применимо к телам, состоящим из очень большого числа молекул.

Согласно кинетической теории средняя энергия E поступательного движения молекул газа связана с его температурой T соотношением

$$E = \frac{3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Распределение энергии поступательного движения между молекулами газа зависит от их скорости.

Для жидкостей и твердых тел функциональная связь температуры с внутренней энергией выражается сложными аналитическими зависимостями. Температура определяет не только характеристики тепловых процессов, от нее зависят многие физические свойства: теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость, температурные коэффициенты линейного и объемного расширения, кристаллические структуры веществ, электрические, магнитные, оптические и атомные свойства.

Температурные зависимости физических свойств веществ можно положить в основу методов измерения температуры и построения температурной шкалы.

Температурная шкала – это ряд последовательных значений температуры, образуемый в соответствии с выбранным законом, определяющим взаимосвязь термометрического параметра (свойства) и температуры.

Для построения температурной шкалы выбирают две основные точки t_1 и t_2 , которым присваивают произвольные значения температуры. Интервал между этими точками ($t_2 - t_1$) называют *основным интервалом температурной шкалы*. Разделив основной интервал на N равных частей, устанавливают цену деления шкалы, другими словами размер единицы температуры

$$M = \frac{t_2 - t_1}{N}.$$

На основе этого уравнения построены следующие температурные шкалы.

Шкала Фаренгейта (1723) определена по двум реперным точкам: за 0°F ($-17,8^\circ\text{C}$) принята температура смеси льда с солью и нашатырем, а за 96°F – температура тела человека ($+36,6^\circ\text{C}$). Точка плавления льда на такой шкале имеет температуру 32°F , а точка кипения воды 212°F . Отсюда следует, что $1/180$ часть интервала между точками плавления льда и точкой кипения воды составляет размер единицы температуры – градуса Фаренгейта ($^\circ\text{F}$). В качестве термометрического вещества Фаренгейт использовал вначале спирт, а затем ртуть.

Шкала Ренкина – температурная шкала с началом при абсолютном нуле, причем размер единицы температуры – градуса Ренкина ($^\circ\text{Rn}$) равен размеру единицы температуры Фаренгейта ($^\circ\text{F}$): $1^\circ\text{Rn}=1^\circ\text{F}$.

Соотношение между температурами T_{Rn} и t_{F} следующее:

$$t_{\text{F}} = T_{\text{Rn}} - 459,67.$$

Шкала Реомюра (1736) основана на ртутном термометре с двумя опорными точками: точкой плавления льда (0°R) и точкой кипения воды (80°R). Интервал между этими точками составляет 80 равных температурных частей, а размер единицы температуры – градуса Реомюра равен $1/80$ части указанного интервала.

Шкала Цельсия (1742) основана на ртутном термометре с двумя опорными точками: точкой плавления льда (0°C) и точкой кипения воды (100°C), интервал между которыми составляем 100 равных температурных частей, а размер единицы температуры – градуса Цельсия равен $1/100$ части указанного интервала.

Связи между температурами Фаренгейта (t_{F}), Реомюра (t_{R}) и Цельсия (t) и их единицами выражаются следующим образом:

$$t^\circ\text{C} = 5/4 t_{\text{R}}^\circ\text{R} = 5/9 (t_{\text{F}}^\circ\text{F} - 32); \quad 1^\circ\text{C} = 4/5^\circ\text{R} = 9/5^\circ\text{F}.$$

Используя различные теоретические свойства, можно построить множество температурных шкал, которые совпадают в одинаковых

опорных точках, но расходятся вне интервала между точками и в самом интервале. Такие температурные шкалы называют условными, а масштабы этих шкал – условными градусами или условными единицами температуры. Условные температуры и условные температурные шкалы называют также практическими в отличие от термодинамической температуры (иначе действительной или истинной) и термодинамической температурной шкалы.

Температура не поддается непосредственному измерению. Поэтому о состоянии теплового равновесия и о значении температуры судят косвенным образом по изменению физических свойств веществ в различных агрегатных состояниях.

Таким образом, физическая основа измерения температуры состоит в том, что при ее изменении меняются почти все физические свойства тел, а следовательно, и значения физических величин, которые их характеризуют. Например, при нагревании или охлаждении тела меняются его линейные размеры, объем, плотность, вязкость, упругость, электропроводность, магнитная проницаемость и т.д.

Для измерения температуры обычно выбирают какое-то вещество или тело и измеряют изменение определенной физической величины, зависящей от температуры. Тело, применяемое для измерения температуры, называется термометрическим телом, а физическая величина, по изменению которой судят об изменении температуры, называется температурным признаком.

В зависимости от используемого термометрического тела и измеряемой величины температурного признака можно выделить следующие принципы измерения температуры, основанные на эффектах сопровождающих изменением:

- объема жидкости или линейных размеров твердых тел;
- давления вещества при постоянном объеме;
- термоэлектродвижущей силы термопары;
- электрического сопротивления проводников и полупроводников;
- электризации поверхности кристаллических диэлектриков;
- интенсивности монохроматического излучения нагретого тела;
- распределения энергии в спектре теплового излучения тела;
- мощности излучения нагретого тела.

7.2. Термометры расширения и манометрические термометры

Термометрами расширения называются приборы, в которых для измерения температуры используется свойство теплового расширения вещества: жидкости, газа или твердого тела. Определение температуры термометрами расширения, как и всякого другого термометра, требует

непосредственного контакта с объектом измерения. Это первые, изобретенные для измерения температуры, приборы.

7.2.1. Стекланные жидкостные термометры

В стекланных жидкостных термометрах при определении температуры используется тепловое расширение термометрической жидкости, заключенной в стекланный резервуар, соединенный с капилляром, на который наносится шкала или крепится шкальная пластина (рис. 7.1).

Основными элементами конструкции термометра (рис. 7.1 а) являются: стекланный резервуар 1, соединительный капилляр 2, измерительный капилляр 3, шкальная пластина 4. В термометрах (рис. 7.1 б), на шкальную пластину которых нанесены дополнительная (нулевая) 1 и основная шкалы 3, имеется утолщение соединительного капилляра – промежуточный резервуар 2.

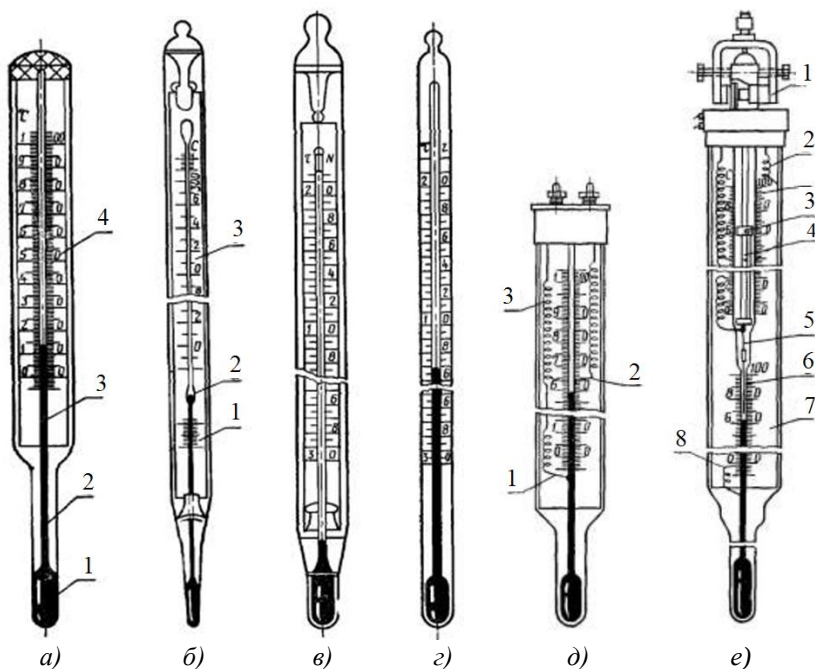


Рис. 7.1. Стекланные жидкостные термометры

Изменение объема в зависимости от температуры для жидкости или твердого тела характеризуется коэффициентом объемного теплового рас-

ширения $\beta_{\text{ж}}(T)$, которое для любого интервала температур соответствует уравнению:

$$\beta_{\text{ж}}(T) = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T},$$

где V – начальный объем; ΔV , – приращение объема (высота столбика жидкости) при изменении температуры на ΔT .

При изменении температуры в стеклянном жидкостном термометре изменяется объем термометрической жидкости одновременно с объемом стеклянных элементов конструкции термометра (резервуаром, капилляром). Поэтому температуру можно измерять только по видимому изменению объема жидкости, равному разности изменений объемов термометрической жидкости и стеклянной оболочки элементов конструкции термометра. Термометрические жидкости стеклянных жидкостных термометров характеризуют коэффициентом видимого расширения термометрической жидкости в стекле $\beta_{\text{в}}$, определяемым по формуле $\beta_{\text{в}} = \beta_{\text{ж}} - \beta_{\text{ст}}$.

Наиболее точные стеклянные жидкостные термометры при одинаковом значении L изготавливаются в небольшом температурном диапазоне, с большим объемом резервуара и минимальным сечением капилляра. Для стеклянных жидкостных термометров с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$ капилляры имеют внутренний диаметр не менее $0,1$ мм, а резервуары обычно не более $2,5$ см³. Уменьшение сечения канала капилляра увеличивает силу трения ртути о его стенки, что приводит к скачкообразному движению ртути при повышении температуры и разрыву столбика ртути при понижении температуры.

В термометрах с малым поперечным сечением капилляра применяют капилляры с овальным сечением, что облегчает отсчет показаний, так как увеличивается видимая ширина ртутного столбика.

Резервуары термометров обычно имеют цилиндрическую или шкалообразную форму. При одинаковом объеме резервуар цилиндрической формы имеет большую поверхность соприкосновения со средой, температура которой измеряется, что уменьшает тепловую инерцию термометра.

Для улучшения качества термометры в процессе изготовления подвергаются искусственному старению и отжигу.

Основные требования к термометрическим жидкостям. Термометрические жидкости (ртуть, толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан) должны обладать возможно большим коэффициентом объемного расширения, небольшой вязкостью и не должны смачивать стекло. Наиболее полно отвечает перечисленным требованиям ртуть. Она не смачивает стекло, используется в широком

диапазоне (от 234,28 до 903,15 К). Термометры, заполненные органическими жидкостями, применяются для измерения температур в диапазоне от 73,15 до 600 К.

Психрометрический термометр предназначен для измерения температуры и определения влажности воздуха путем сравнения показаний двух термометров, укрепленных на одном основании. Резервуар одного термометра сухой, а у другого смачивается водой. Влажность определяют по таблице, прикрепленной к основанию, рядом с термометрами.

Термометры лабораторные используются в качестве эталонов и рабочих для измерения температур в производственных и лабораторных условиях. В них термометрическим веществом является ртуть. Применяют лабораторные термометры для измерения температуры в диапазоне от -30 до $+600^{\circ}\text{C}$. Конструктивно они выполняются палочными и с вложенной шкальной пластиной (рис. 7.1 в, з). Градуируют лабораторные термометры, как правило, при полном погружении или при указанной глубине погружения в зависимости от назначения термометра.

К лабораторным термометрам относятся палочные термометры, у которых расстояние между штрихами по всей шкале одинаково. Их используют в качестве эталонов. Переход от делений равномерной шкалы к температуре производится по таблицам, составленным индивидуально для каждого термометра в процессе его аттестации.

Электроконтактные термометры и термоконтакты предназначены для сигнализации и регулирования температуры в заданном диапазоне. Они изготавливаются палочными и с вложенной шкальной пластиной, прямыми и угловыми. По конструкции их относят к термометрам с заданными постоянными контактами ТЗК (рис. 7.1 д) и с подвижными контактами ТПК (рис. 7.1 е).

Во всех конструкциях общий соединительный контакт выполнен из платиновой проволоки диаметром 0,1 мм и впаян в нижнюю часть капилляра.

В термометрах ТЗК (рис. 7.1 д) в места капилляра, соответствующие положению мениска при заданной температуре, впаивают платиновые контакты 2, аналогичные нижнему соединительному 1. На платиновые контакты для исключения потерь напаивается стеклянная пуговичка, от которой начинается контактный паяный переход на медный провод 3 с диаметром не менее 0,3 мм. Значения заданных температур контактирования обозначены отметками на шкале. Количество точек контактирования не более трех.

В термометрах ТПК (рис. 7.1 е) подвижной контакт 5 выполняют из вольфрамовой проволоки диаметром не более 0,1 мм. Проволока

закреплена сверху на гайке 3, которая перемещается микрометрическим винтом 4. Нижний конец вольфрамовой проволоки вставлен в капилляр 6, в котором он должен свободно перемещаться во всем диапазоне регулирования температуры. Вращая микрометрический винт, можно изменять положение контакта, а, следовательно, заданное значение температуры. Винт вращается посредством герметической магнитной муфты 1. Неподвижный контакт образован платиновым электродом, касающимся столбика ртути в нижней части капилляра. К электроду припаяна медная проволока 8 (она же видна под позицией 2 в верхней части термометра).

Обозначение типов термометров. Технические термометры – ТТ, ТП; метеорологические и гидростатические – ТМ, ТГ; лабораторные термометры – ТЛ, ТР; термоконтакты – ТК; термометр контактный с заданной температурой – ТЗК; термометр с переменным контактом и магнитной регулировкой – ТПК. Кроме перечисленных выше термометров, стеклянные жидкостные термометры изготавливают для нефтепродуктов (обозначение типа – ТН); сельскохозяйственные (обозначение типа – ТС); термометры специальные (обозначение типа – СП), предназначенные для эксплуатации в технических установках специального назначения; термометры бытовые (обозначение типа – ТБ) и др.

Метрологические характеристики стеклянных жидкостных термометров. Погрешности термометров можно классифицировать как погрешности показаний термометров при нормальных условиях работы (1); погрешности градуировки шкалы (2) и погрешности, обусловленные отклонением условий от нормальных (3).

7.2.2. Манометрические термометры

Манометрический принцип измерения температуры основан на использовании зависимости давления вещества в замкнутом постоянном объеме от температуры. В качестве термометрического тела используется газ (обычно азот), жидкость (ртуть, метиловый спирт, ксилол). Зависимость давления газа от температуры выражается уравнением:

$$P_t = P_0 [1 + \beta(t - t_0)],$$

где $\beta = \frac{1}{273,15}$ град⁻¹ – термический коэффициент расширения газа; t_0 и t – соответственно начальная и конечная температуры в °С; P_0 – давление рабочего вещества при t_0 .

Изменение давления от температуры для жидкости можно представить уравнением:

$$\Delta P = \frac{\beta}{\mu} \Delta t,$$

где P – изменение давления; β – коэффициент объемного расширения жидкости; μ – коэффициент сжимаемости жидкости; t – изменение температуры.

Как видно из уравнений, изменение давления газа и жидкости при нагревании их в замкнутом объеме является линейной функцией изменения температуры.

К преимуществам манометрических термометров по сравнению с аналогичными преобразователями другого принципа действия относят возможность дистанционного измерения параметров без использования источников дополнительной энергии; простоту конструкции и большую надежность при эксплуатации; равномерность шкалы; взрывобезопасность; отсутствие чувствительности к внешним электромагнитным полям. Манометрические термометры (рис. 7.2) состоят из герметично замкнутой термосистемы (термобаллон, соединительный дистанционный капилляр, упругий чувствительный элемент) и показывающего или записывающего устройства. В зависимости от заполнителя термосистемы манометрические термометры изготовляют трех видов: *газовые* – с азотом; *жидкостные* – с полиметилсилоксановыми жидкостями; *конденсационные* (парожидкостные) – с ацетоном, метилом, хлоридом фреона.

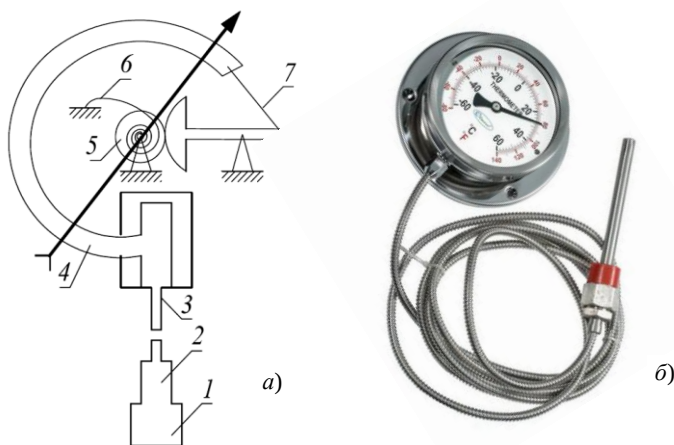


Рис. 7.2. Схема устройства и вид манометрического термометра:
а – схема устройства: 1 – термобаллон; 2 – хвостовик; 3 – капилляр; 4 – манометрическая трубка (пружина); 5 – зубчатое колесо, соединенное со стрелкой; 6 – спиральная пружина, служащая для устранения люфта в зубчатом зацеплении; 7 – тяга; 8 – зубчатый сектор; *б – общий вид*

Дистанционный капилляр изготовлен из латуни или сталей X18H10T и X18H10T-M. Для защиты от механических повреждений капилляр помещен в оболочку из полиэтилена или оцинкованной стальной ленты.

Термобаллон металлических термометров снабжен жестким трубчатым хвостовиком различной длины, позволяющим погружать его в измеряемую среду на необходимую глубину, которая оговаривается при заказе термометра. Для присоединения термобаллона к установке служит штуцер из стали А20 или X18H10T.

При погружении термобаллона в среду под давлением свыше $64 \cdot 10^5$ Па, а также в случае, если смена термобаллона может повлечь за собой остановку аппарата, рекомендуется применять защитную гильзу, выдерживающую давление $250 \cdot 10^5$ Па. Для снижения тепловой инерции пространство между гильзой и термобаллоном заполнено металлическими опилками или жидкостью с температурой кипения более высокой, чем верхний предел измерений.

Жидкостные манометрические термометры. Вся термосистема манометрического термометра заполнена термометрической жидкостью. При повышении температуры объем жидкости увеличивается соответственно разности теплового расширения жидкости и резервуара и приводит к изменению давления. Изменение давления в термосистеме приводит к изменению положения свободного конца манометрической пружины, которое соответствует изменению температуры среды.

В качестве упругого чувствительного элемента в жидкостных манометрических термометрах применяют трубчатые (манометрические) пружины постоянной чувствительности. Объем термобаллона рассчитывают таким образом, чтобы рабочее давление не вызывало пластических деформаций манометрической пружины. Шкала жидкостных манометрических термометров практически равномерна.

7.3. Термометры дилатометрические

Принцип действия их основан на использовании свойства твердого тела изменять свои линейные размеры при изменении температуры. При небольших температурных диапазонах зависимость длины твердого тела от температуры линейна

$$l_t = l_0 \cdot (1 + \alpha t),$$

где l_t – длина тела при температуре t , м; l_0 – длина тела при температуре 0°C , м; α – средний коэффициент линейного расширения твердого тела от 0°C до t , K^{-1} .

В дилатометрических термометрах расширения две трубки из материалов с разными температурными коэффициентами линейного

расширения одним концом скреплены друг с другом (рис. 7.3). Свободные концы перемещаются по-разному, что используется для измерения температуры.



Рис. 7.3. Чувствительный элемент дилатометрического преобразователя

Коэффициенты линейного расширения для различных материалов различны и составляют для латуни $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, для инвара $0,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. Из-за небольшого теплового расширения длина внешней и внутренней трубок, должна быть достаточно большой, около 300 мм.

Из-за длинных металлических трубок, идущих от объекта измерения наружу, велик отвод тепла, в результате чего возникает большая погрешность при измерении температуры. По этой же причине дилатометрические термометры обладают большой инерционностью, что отрицательно сказывается на регулировании температуры.

Дилатометрические термометры могут развивать большие усилия, поэтому их используют в качестве регулирующих устройств с электрическими контактами для двухпозиционного регулирования.

Применяются в регуляторах температуры котлов, охлаждающей жидкости ДВС и др.

7.4. Термометры биметаллические

Биметаллический термометр представляет собой прочное соединение двух пластин металлов или сплавов с разными коэффициентами линейного теплового расширения (рис. 7.4).

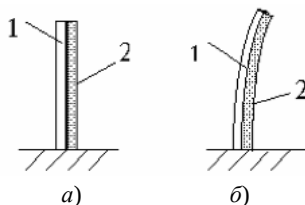


Рис. 7.4. Схема чувствительного биметаллического элемента:
а – при нормальной температуре; *б* – при повышенной температуре;
 1 – латунь; 2 – инвар

Толщина пластин примерно одинаковая. При воздействии тепла биметалл изгибается в сторону слоя с меньшим коэффициентом линейного расширения. Биметаллическая пластина является чувствительным элементом термометра, изгиб ее при изменении температуры передается на механизм показывающего устройства или на контактную группу, которая замыкается или размыкается (7.5).

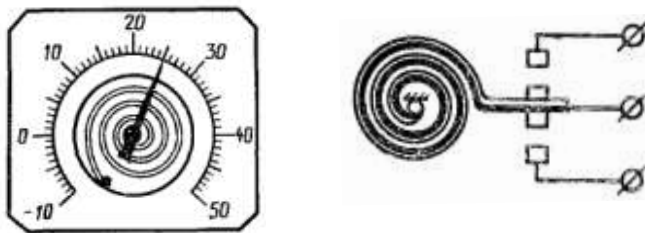


Рис. 7.5. Биметаллический термометр с плоской спиралью и биметаллическое температурное реле

Перемещение биметаллической пластины (изгиб), механически закрепленной на одном конце, можно рассчитать по формуле

$$A = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)L^2}{b}(t_2 - t_1),$$

где α_1, α_2 – коэффициенты линейного расширения биметалла, K^{-1} ; b – толщина биметаллической пластины, м; L – длина биметаллической пластины, м; $(t_2 - t_1)$ – разность температур, для которой определяется изгиб A , K^{-1} .

Перемещение тем больше, чем длиннее и тоньше биметаллическая пластина, но не зависит от ее ширины.

Диапазон измеряемых температур биметаллических термометров находится в интервале от -60 до $+600^{\circ}C$ и зависит от материала биметалла.

Биметаллические показывающие термометры используются для измерения температуры в помещениях. В них применены биметаллы в виде плоской спирали вставленной в защитную арматуру.

В термометрах спираль соединена со и стрелкой, в биметаллических термореле – с контактной группой. Недостаток подобного термореле заключается в том, что его контакты срабатывают недостаточно четко и вследствие этого подгорают. Поэтому в усовершенствованной конструкции реле спираль освобождает пружину, которая обеспечивает резкое срабатывание контактной системы.

7.5. Термоэлектрические преобразователи. Термопары

Основаны на термоэлектрических явлениях Зеебека, Пельтье и Томсона.

Явлением Зеебека называют возникновение термо-э.д.с. ε_T в замкнутой цепи составленной из разнородных проводников, если места их контакта (спаи) поддерживают при различных температурах. Эффект возникновения термо-э.д.с. объясняется тем, что свободные электроны в разных проводниках испытывают неодинаковое давление и при соприкосновении начинают диффундировать из одного проводника в другой, выравнивая их внутренние потенциалы. На этом принципе устроены термоэлектрические преобразователи – термопары. Чувствительным элементом термопары является спай. Зная закон изменения термо-э.д.с. термопары от температуры и, определяя значение термо-э.д.с. электроизмерительным прибором, можно найти искомое значение температуры в месте измерения.

Явление Пельтье. Это явление, открытое Пельтье в 1834 г., заключается в том, что при протекании тока через цепь, составленную из разнородных металлов или полупроводников, в одних спаях происходит выделение, а в других – поглощение теплоты, избыточной над джоулевой, которая называется теплотой Пельтье. Таким образом, явление Пельтье оказывается обратным явлению Зеебека. Явление Пельтье используется для создания холодильных установок.

Явлением Томсона называют выделение (или поглощение) теплоты, избыточной над джоулевой, при прохождении постоянного тока по неравномерно нагретому однородному проводнику или полупроводнику.

Термоэлектрический термометр состоит из двух спаянных и изолированных по длине термоэлектродов, защитного чехла и головки с контактами для подключения соединительной линии. Существует большое количество материалов, которые можно использовать в качестве термоэлектродов. Все материалы по своим термоэлектрическим свойствам можно подразделить на положительные и отрицательные. Измерение термо-э.д.с. осуществляют при помощи магнитоэлектрических милливольтметров или цифровых приборов, отградуированных в градусах.

Если взять цепь (рис. 7.6), составленную из двух различных термоэлектрически однородных по длине проводников A и B , то при подогреве спая 1 в цепи появится электрический ток, который в более нагретом спае 1 направлен от проводника B к проводнику A , а в холодном спае 2 – от B к A . При подогреве спая 2 ток получает обратное направление. Такие токи называются термоэлектрическими. Электродвижущая сила, обусловленная неодинаковыми температурами мест соединения 1 и 2 , называется термоэлектродвижущей силой, а создающий ее преобразователь – термоэлектрическим первичным

преобразователем или термопарой. Спай, погружаемый в измеряемую среду, называется рабочим или горячим спаем термопары; второй спай носит название свободного или холодного.

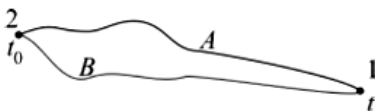


Рис. 7.6. Схема контура термоэлектрического термометра

Суммарную электродвижущую силу замкнутой цепи из проводников A и B , спай которой нагреты до температур t и t_0 , можно выразить уравнением:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0),$$

где $E_{AB}(t, t_0)$ – суммарная термо-э.д.с. термопары; $e_{AB}(t)$ и $e_{BA}(t_0)$ – потенциалы, возникающие в местах соприкосновения проводников. Индексы при E и e указывают направление термо-э.д.с.: от A к B или от B к A .

При введении в цепь термопары третьего проводника, если концы последнего имеют одинаковые температуры, термо-э.д.с. термопары не изменяется (то же относится и к нескольким проводникам). Поэтому включение в цепь термопары соединительных проводов, измерительных приборов и подгоночных сопротивлений не отражается на точности измерения. Один из спаев термопары называется рабочим t_p или горячим, другие – свободными концами или холодными $t_{св}$.

Температуру свободных концов термопары необходимо поддерживать равной 0°C . Схема компенсации температуры холодных спаев показана на рис. 7.7. На практике температура свободных концов термопары, в большинстве случаев, поддерживается постоянной, но не равной 0°C . Свободные концы термопары соединяются с медными монтажными проводами и образует дополнительную термопару, в которой также возникает термо-э.д.с. Если поправку не вводить, то возникает погрешность измерения температуры Δt . Поэтому вводится поправка на температуру свободных концов термоэлектрического термометра, с использованием мостовой схемы, приведенной на рис. 7.8. При этом статическая характеристика смещается вертикально вверх или вниз относительно номинальной, что вызывает необходимость введения поправки по уравнению:

$$E(t, 0^\circ\text{C}) = E(t, t_0) \pm E(t_0, 0^\circ\text{C}),$$

где $E(t, 0^\circ\text{C})$ – номинальная термо-э.д.с., развиваемая термопарой при температурах рабочего спая t и холодного спая $t_0 = 0^\circ\text{C}$; $E(t, t_0)$ – термо-э.д.с.,

развиваемая термопарой при температурах рабочего t и холодного t_0 спаев; $E(t_0, 0^\circ\text{C})$ – поправочная термо-э.д.с., развиваемая термопарой при температурах рабочего спая t_0 и свободного 0°C . Поправка $E(t_0, 0^\circ\text{C})$ имеет знак "плюс" в случае, когда $t_0 > 0^\circ\text{C}$, а "минус" – в случае, когда $t_0 < 0^\circ\text{C}$.

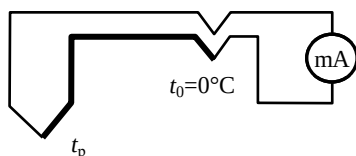


Рис.7.7. Схема компенсации температуры холодных спаев

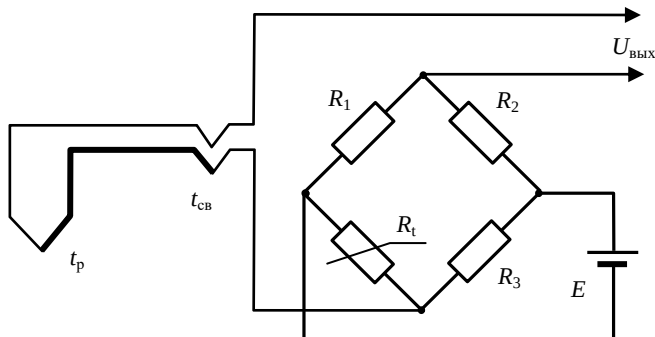


Рис. 7.8. Схема введения поправки температуры холодных спаев

Для удлинения выводов термопар используют термоэлектродные компенсационные провода. Они состоят из двух жил, изготовленных из металлов или сплавов, имеющих одинаковые термоэлектрические свойства с термоэлектродами термометра и применяющиеся для подключения к вторичным измерительным преобразователям (измерительным приборам).

7.6. Типы и характеристики термоэлектрических термометров

Термоэлектрические термометры, получившие практическое применение, разделяются по материалу термоэлектродов на две группы: из благородных и неблагородных металлов и сплавов. Также они различаются допустимым диапазоном измерения и чувствительностью. Для измерения температур до 1100°C используют в основном термопары из неблагородных металлов, а для измерения температур выше 1100 и до 1600°C – термопары из благородных металлов платиновой группы и, наконец, для измерения температур более 1600°C – различные термопары, изготовленные из очень жароупорных материалов (см. табл. 7.1).

Особенно широко применяется термопара хромель – алумель. Эта термопара хорошо работает в окислительной среде благодаря возникновению при нагреве тонкой защитной пленки окислов, препятствующей проникновению кислорода внутрь металла. Восстановительная среда, напротив, вредно действует на эту термопару, разрушая пленку окислов.

Термопара хромель – копель химически стойка в окислительной и несколько менее стойка в восстановительной средах (в пределах температур до 600°C). следует особо отметить высокую термо-э.д.с., развиваемую термопарой хромель – копель, однако ее термоэлектрическая характеристика отличается значительно большей нелинейностью по сравнению с характеристикой термопары хромель – алумель.

При наименовании термометров первым обычно указывается положительный термоэлектрод. Направление термо-э.д.с. зависит лишь от природы материалов, используемых в качестве термоэлектродов. Положительным называют тот термоэлектрод, по направлению к которому ток идет через рабочий спай термопары.

7.1 Стандартные промышленные термопары

Тип	Наименование материалов термоэлектродов	Обозначение НСХ	Чувствит. термопар, мВ на 100 °С	Диапазон измерений при длительном применении, °С	Допускаемый предел измерений при кратковременном применении, °С
ТХК	Хромель-копель	ХК	6,95	–200...+600	800
ТХА	Хромель-алюмель	ХА	4,10	–200...+1000	1300
ТПП	Платинородий (10% родия)- платина	ПП	0,643	0...1300	1600
ТПР	Платинородий (30% родия)- платинородий (6% родия)	ПР30/6		300...1600	1800
ТВР	Вольфрамрений (5% рения)- вольфрамрений (20% рения)	ВР5/20		0...2200	2500

Конструктивно термоэлектрический термометр представляет собой две проволоки из разнородных материалов, нагреваемые концы которых

скручиваются, а затем свариваются или спаиваются. Для защиты от механических повреждений и воздействия среды, температура которой измеряется, электроды термоэлектрического термометра, армированные изоляцией, помещаются в специальную защитную арматуру, показанной на рис. 7.9. У рабочих термоэлектрических термометров, применяемых для измерения температуры различных сред, арматура состоит из защитной гильзы 1, неподвижного 2 или передвигного штуцера с сальниковым уплотнением и головки 3, соединенной с неподвижным штуцером с помощью трубки 6 или непосредственно с гильзой при передвигном штуцере. В головке 5, помещена розетка 4 с зажимами для присоединения термоэлектродов 7 и проводов, соединяющих термометр с измерительным прибором или преобразователем.

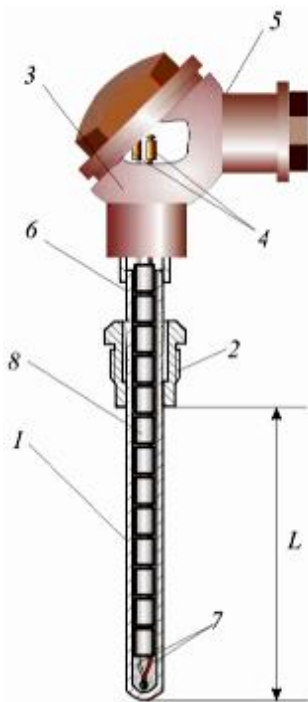


Рис. 7.9. Конструкция термопары

Основным вопросом при конструировании термопар промышленного типа является выбор материала защитной трубы (арматуры) и изоляции. Защитная арматура термопары должна оградить ее от воздействия горячих, химически агрессивных газов, быстро разрушающих термопару. Поэтому арматура должна быть газонепроницаемой, хорошо проводящей тепло, механически стойкой и жароупорной. Кроме того, при нагревании она не должна выделять газов и паров, вредных для термоэлектродов.

При температурах, не превышающих 600°C , обычно применяют стальные трубы без шва, при более высоких температурах (до 1100°C) – защитные трубы из легированных сталей. Для уменьшения стоимости защитных труб их часто выполняют составными (сварными) из двух частей: рабочий участок трубы – из нержавеющей стали, а нерабочий – из обычной стали.

Для термопар из благородных металлов часто применяют неметаллические трубы (кварцевые, фарфоровые и т.д.); однако такие трубы механически непрочны и дороги. Фарфоровые трубы надлежащего состава можно использовать при температурах до $1300\ldots 1400^{\circ}\text{C}$.

В качестве изоляции термоэлектродов друг от друга применяют асбест – до 300°C; кварцевые трубки или бусы – до 1000°C; фарфоровые трубки или бусы – до 1300...1400°C. Для лабораторных термодатчиков, используемых при измерении низких температур, применяют также теплостойкую резину – до 150°C; шелк – до 100...120°C; эмаль – до 150...200°C.

7.7. Физические основы действия термопреобразователей сопротивления

Термопреобразователи сопротивления (термометры сопротивления) широко применяются для измерения температуры в интервале от –260 до +750°C. В отдельных случаях они могут быть использованы для измерения температур до 1000°C.

Термопреобразователи сопротивления – это преобразователи, принцип действия которых основан на свойстве вещества изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры.

Свойство проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление при изменении температуры, положено в основу измерения температуры. У большинства чистых металлов с ростом температуры сопротивление увеличивается приблизительно на 0,4 %/град, а у металлов ферромагнитной группы (железо, никель, кобальт) – приблизительно на 0,65 %/град. Металлические сплавы имеют более низкие температурные коэффициенты вплоть до значений, близких к нулю. Очень большие отрицательные температурные коэффициенты, когда сопротивление уменьшается с увеличением температуры, наблюдаются у некоторых полупроводниковых соединений (см. табл. 7.2).

Омическое сопротивление проводника или полупроводника представляет собой некоторую функцию его температуры $R = f(t)$. Вид этой функции зависит от природы материала. Материалы, используемые в термометрах сопротивления, должны обладать следующими свойствами:

- высоким удельным сопротивлением;
- химической инертностью;
- легкой технологической воспроизводимостью;
- постоянством физических свойств во времени;
- высоким и неизменным температурным коэффициентом

Статическая характеристика металлических термометров сопротивления близка к линейной и может быть записана в виде формулы:

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 и R – сопротивление термометра соответственно при 0°C и измеряемой.

Указанным требованиям в определенных температурных пределах наиболее полно отвечают платина (Pt), медь (Cu), никель (Ni), железо (Fe). Платина – дорогостоящий материал, химически инертен и легко получается в чистом виде. Удельное сопротивление платины $\rho = 0,0981 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, при 0°С – достаточно большое. При температуре t полное сопротивление R_t термометра определяется зависимостями: для $t > 0^\circ\text{C}$

Для меди и платины температурный коэффициент сопротивления соответственно равен: $\alpha_{\text{Cu}} = 4,28 \cdot 10^{-3}$, 1/°С; $\alpha_{\text{Pt}} = 3,9 \cdot 10^{-3}$, 1/°С. Серийно выпускаемые термопреобразователи сопротивления имеют унифицированные или номинальные статические характеристики (НСХ)

7.2 Основные характеристики металлических термопреобразователей сопротивления

Тип термометра	Обозначение НСХ	Пределы измерений, °С		Сопротивление, Ом		Примечание
		нижний	верхний	при 0°С	при 100°С	
ТСП	10П	0	650	10	13,91	платина
ТСП	100П	–200	500	100	139,1	платина
ТСП	50П	–200	500	50	69,56	платина
ТСМ	100М	–50	180	100	142,6	медь
ТСМ	50М	–50	180	50	71,4	медь

7.8. Полупроводниковые терморезисторы

Полупроводниковые терморезисторы изготавливаются на основе оксидных материалов с добавлением стабилизирующих веществ (оксидов никеля, углерода, магния), обеспечивающих требуемое значение сопротивления. При помощи пластичного связующего вещества методом прессования смеси придается необходимая форма (сферическая, цилиндрическая, бусиновая) (см. рис. 7.10).

Температурная зависимость сопротивления большинства терморезисторов выражается уравнением: $R = A \cdot \exp(B/T)$, где A и B постоянные коэффициенты, T – температура, К. Эти терморезисторы принято называть термисторами. Они имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления и при нагревании сопротивление у них значительно снижается. Есть другая группа полупроводниковых терморезисторов, у которых температурный коэффициент сопротивления в диапазоне измерения положителен, и они называются позисторами. Для измерения температуры применяются

терморезисторы в виде плоской шайбы, тонкого диска или бусинки небольшого диаметра. Бусиновые терморезисторы диаметром до 0,5 мм покрытые глазурью имеют малую инерцию и могут применяться для измерения быстроменяющихся температур. Для защиты от возможного агрессивного влияния окружающей среды, терморезисторы могут помещаться в тонкостенные стеклянные или металлические трубки, обеспечивающие тепловой контакт с терморезистором. Некоторые виды терморезисторов приведены на рисунке 7.10.

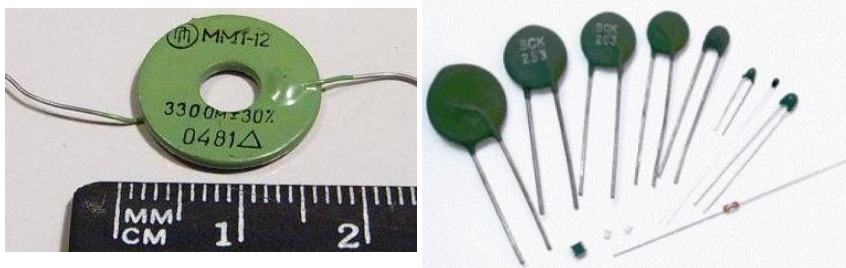


Рис. 7.10. Полупроводниковые термисторы различных типов

Статические характеристики Термисторы имеют нелинейную статическую характеристику, общий вид которой представлен на следующем рис. 7.11. Для сравнения представлены характеристики медного терморезистора 1 и полупроводникового 2

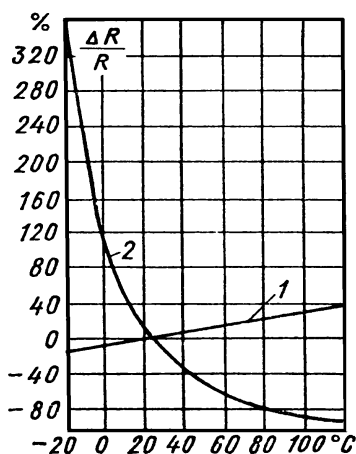


Рис. 7.11. Статическая характеристика термистора

Позисторы имеют также нелинейную статическую характеристику, однако вид ее (см. рис. 7.12) значительно отличается от вида статической характеристики термистора. Они имеют положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС). Материалом для изготовления позисторов служит титанат бария BaTiO_3 , легированный примесями редкоземельных элементов, таких как стронций, церий, ниобий и т.п.

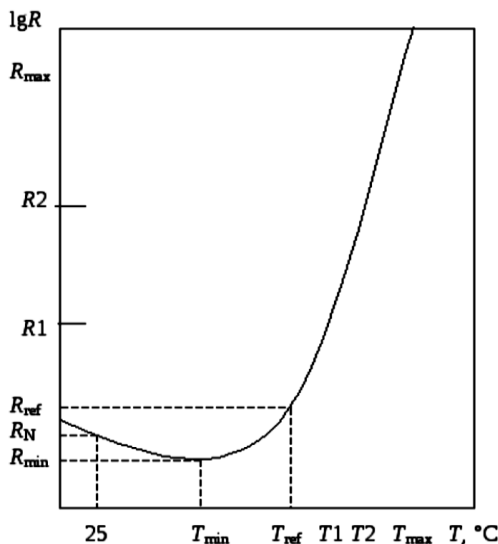


Рис. 7.12. Статическая характеристика позистора:

$R_{\min}$ — минимальное сопротивление (сопротивление при $T = T_{\min}$); $T_{\min}$ — температура, при которой ТКС из отрицательного становится положительным; R_{ref} — опорное сопротивление ($R_{\text{ref}} = 2R_{\min}$). Считается, что с R_{ref} начинается быстрый рост зависимости $R = f(T)$; T_{ref} — характеристическая температура, при которой $R = R_{\text{ref}}$; (для ряда позисторов вместо T_{ref} и R_{ref} указываются пороговая температура T_{NAT} и соответствующее ей значение сопротивления R_{NAT} , лежащие немного выше T_{ref} и R_{ref}); $T_{\max}$ — максимально допустимая температура термистора; $R_{\max}$ — сопротивление при $T_{\max}$.

7.9. Схемы включения термопреобразователей сопротивления

Термопреобразователи сопротивления относятся к параметрическим датчикам температуры, поэтому всегда измерительные схемы на их основе должны иметь источник питания. При этом источник питания должен быть таким, чтобы разогревом чувствительного элемента за счет протекания по нему тока можно было пренебречь. Как правило, измерительный преобразователь подключается к измерительной схеме за счет соединяю-

щего кабеля, имеющего свое собственное сопротивление, которое может зависеть от температуры окружающей среды. Если термопреобразователь подключен по *двухпроводной* схеме, то может возникнуть погрешность измерения температуры в месте установки чувствительного элемента (см. рис. 7.13). Это объясняется тем, что в этом случае к падению напряжения на термопреобразователе прибавляется падение напряжения на сопротивлениях R_L подводящих проводов.

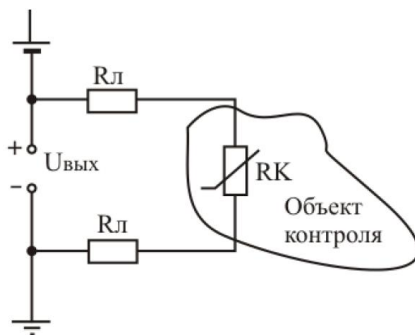


Рис. 7.13. Двухпроводная схема подключения термопреобразователей

Чувствительность к температуре окружающей среды можно уменьшить, добавив в измерительную систему один или два дополнительных провода, получив, таким образом *трехпроводную* или *четырёхпроводную* схему включения.

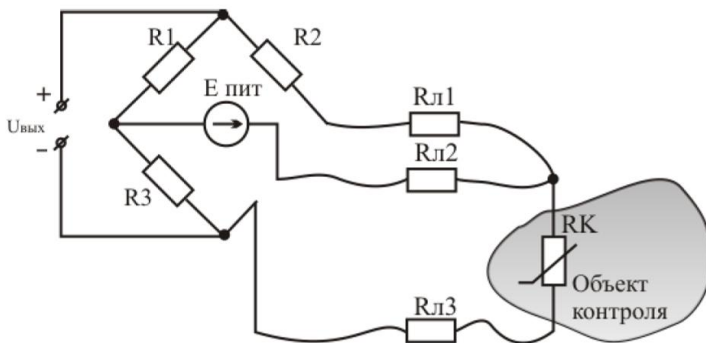


Рис. 7.14. Трехпроводная схема подключения термопреобразователя сопротивления

При трехпроводной схеме включения (см. рис. 7.14), к чувствительному элементу термопреобразователя сопротивления RK подключаются три провода, один из которых является питающим, а два других включены в смежные плечи мостовой схемы. Изменение температуры окружающей среды не будет сказываться на напряжении $U_{вых}$, при условии, что проводники с сопротивлением $R_{л1}$ и $R_{л3}$ всегда имеют одинаковые температуры. Сопротивления подводящих проводов при такой схеме включения необходимо подгонять до одного из стандартных значений: 2,5 Ом, 5 Ом или 10 Ом, иначе изменение длины кабеля может повлиять на точность измерения температуры.

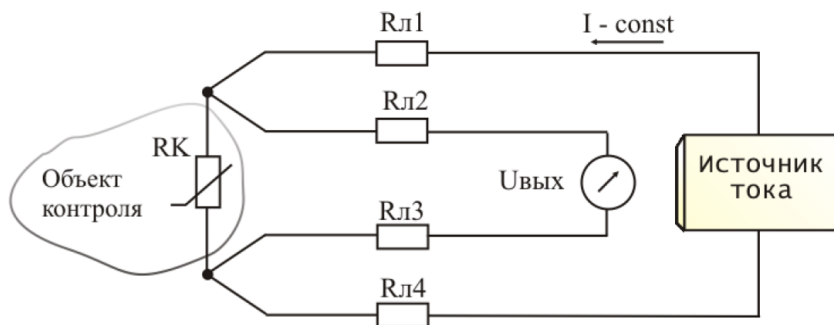


Рис. 7.15. Четырехпроводная схема подключения термопреобразователя сопротивления

При четырехпроводной схеме включения (см. рис. 7.15) по двум проводам с сопротивлениями $R_{л1}$ и $R_{л4}$ к термопреобразователю подводится постоянный ток (обычно 5 мА), а с помощью проводников с сопротивлениями $R_{л2}$ и $R_{л3}$ от термопреобразователя на измерительный прибор отводится падение напряжения, пропорциональное сопротивлению RK и температуре объекта контроля. Если источник тока обеспечивает стабильный ток при различных сопротивлениях нагрузки, а входное сопротивление измерительного прибора достаточно велико, то результат измерения не зависит ни от температуры подводящих проводов, ни от их длины.

7.10. Цифровые термометры

Рассмотрим один из наиболее распространенных вариантов устройства цифрового термометра (ЦТ), входным датчиком которого является термоэлектрический преобразователь. На рис. 7.16 приведена упрощенная структура контактного ЦТ, которая напоминает структуру любого цифрового измерительного прибора.



Рис. 7.16. Структурная схема цифрового термометра

Термопара подключается к входу усилителя, назначение которого поднять уровень входного сигнала с единиц-десятков милливольт до единиц вольт. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует усиленный сигнал термопары в цифровой код, пропорциональный уровню термо-э.д.с. и, следовательно, значению измеряемой температуры. В автономных ЦТ, как правило, применяются АЦП, использующие интегрирующие методы преобразования, обеспечивающие высокие точность, чувствительность, разрешающую способность, высокое подавление периодических помех общего и нормального вида, уровень которых может быть значительным. Выходной код АЦП запоминается (и затем некоторое время хранится) в регистре и выводится на цифровой индикатор (цифровое отсчетное устройство). Микропроцессорный контроллер управляет работой всех узлов прибора. Он же выполняет функцию линеаризации характеристики статической характеристики. С помощью клавиатуры оператор задает режимы работы. В структуре прибора может присутствовать интерфейс для обмена информацией с внешними цифровыми устройствами (например, для передачи результатов регистрации в персональный компьютер и (или) в систему автоматизированного управления).

7.11. Физические основы измерения температуры бесконтактным методом

Для измерения температуры можно использовать тепловое излучение, так как параметры теплового излучения нагретых тел зависят от их температуры. При этом нет необходимости в контакте средства измерения и объекта измерения. Таким образом, методы, основанные на принципах преобразования теплового излучения объекта измерения в измеряемую физическую величину, называют бесконтактными или **пирометрически-**

ми методами измерения температуры, а средства измерения, реализующие эти методы, – **пирометрами**. Раздел температурных измерений бесконтактным способом, называют пирометрией.

Тепловое излучение возникает в результате теплового возбуждения частиц вещества (атомов, молекул). Энергия такого излучения определяется только температурой и оптическими свойствами излучающего тела. Тепловое излучение носит электромагнитный характер, т. е. представляет собой совокупность электромагнитных волн или фотонов. Оно, как и всякое излучение, описывается энергетическими и спектральными (частотными) характеристиками. Область частот или спектр излучения может быть сплошным, линейчатым и полосовым. Для твердых и жидких тел характерно наличие сплошного спектра излучения. В спектре электромагнитных излучений выделяют несколько областей, в том числе: оптическую, гамма-излучений, радиочастот.

В пирометрии в основном используется оптическая область спектра и редко область радиочастот. Оптическая область, в свою очередь, подразделяется на области ультрафиолетового, видимого и инфракрасного излучения. Диапазон ультрафиолетового излучения распространяется от 10 до 380 нм. Видимая область спектра от 380 до 780 нм. Инфракрасная область спектра от 760 нм до 1 мм.

Монохроматическим называют излучение, соответствующее узкому интервалу длин волн.

Интегральное излучение – это излучение, соответствующее всему спектру длин волн в пределах от нуля до бесконечности.

С энергетической точки зрения излучение характеризуют следующие величины:

Поток излучения Φ (мощность излучения) равен энергии W , излучаемой поверхностью в полусферу в единицу времени: $\Phi = dW/dt$. Измеряется в ваттах.

Сила излучения I – это пространственная плотность излучения, равная энергии, излучаемой телом в данном направлении за единицу времени внутри единичного телесного угла Ω : $I = d\Phi/d\Omega$. Измеряется в ваттах настерадиан.

Энергетическая светимость R_T (Дж/м²с) равна потоку излучения, отнесенному к единице излучающей поверхности S . Измеряется в ваттах на квадратный метр.

Лучеиспускательная способность $r_{\lambda,T}$ (Дж/м²с) – это лучистая энергия, излучаемая единичной поверхностью за единицу времени при данной температуре.

Энергетическая яркость $E_{\lambda,T}$ равна энергии излучения, испускаемого в единицу времени в единичный телесный угол в данном направлении

площадкой, проекция которой на плоскость, перпендикулярную к данному направлению, равна единице площади:

Всякое тело при температуре выше абсолютного нуля излучает энергию, которое зависит от температуры тела и его оптических свойств. Для сравнения излучения любых тел, введено понятие «абсолютно черное тело», излучение которого зависит только от его температуры. «Абсолютно черное тело» поглощает все падающее на него излучение независимо от длины волны этого излучения. Следовательно, излучение любого тела может оцениваться через коэффициент излучения как доля черного излучения.

Теория теплового излучения основана на законах

Кирхгофа $\frac{r_{\lambda,T}}{a_{\lambda,T}} = E_{\lambda,T}$,

Стефана-Больцмана $R_T = E_T = \sigma T^4$, $R_T = K\sigma(T^4 - T_0^4)$,

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$ – постоянная Стефана-Больцмана, K – коэффициент нечерноты ($K < 1$), зависящий от материала излучающей поверхности.

Вина $\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$ $E_{\lambda_{\max}} = C \cdot T^5$,

где $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – первая постоянная Вина. $C = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Вт /м}^3\text{К}^5$ – вторая постоянная Вина

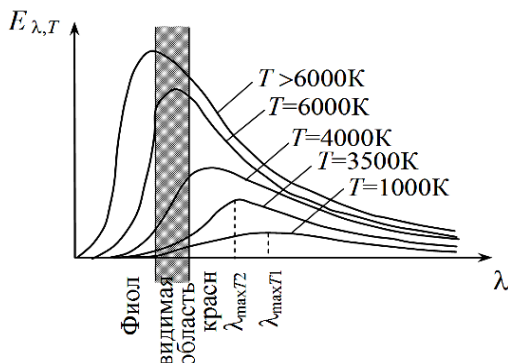


Рис. 7.17. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела

Для абсолютно черного тела характерны следующие закономерности теплового излучения (см. рис. 7.17):

- при повышении температуры тела возрастает спектральная энергетическая яркость и светимость на всех длинах волн;

- при нагревании тела максимум спектральной светимости смещается в сторону более коротких длин волн (закон смещения Вина);
- с ростом температуры тела возрастает полная (интегральная) светимость поверхности объекта.

Данные закономерности положены в основу принципа действия яркостных, цветовых и радиационных пирометров.

7.12. Яркостные пирометры

Зависимость спектральной энергетической яркости теплового излучения тела от температуры этого тела положена в основу принципа **яркостных пирометров**.

Принцип действия оптического яркостного пирометра «с исчезающей нитью» основан на сравнении яркости объекта измерения и яркости градуированного источника излучения с определенной длиной волны (см. рис. 7.18).

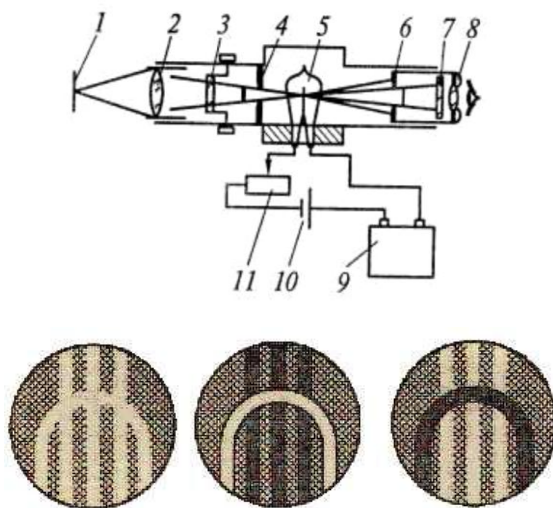


Рис. 7.18. Схема яркостного пирометра и принцип действия:

- 1 — излучатель; 2 и 3 — линза; 4 и 6 — диафрагма; 5 — нить накаливания;
7 — светофильтр; 8 — линза окуляра; 9 — регистрирующий прибор;
10 — источник питания; 11 — реостат

Изображение излучателя 1 фокусируется в плоскости нити накаливания 5. Оператор на фоне раскаленного тела видит нить лампы. Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через

лампу, и добивается уравнивания яркостей нити и излучателя. Момент «исчезновения» нити на фоне объекта соответствует равенству яркостей нити и объекта излучения. Регистрирующий прибор 9 фиксирует силу тока, соответствующую этому моменту, и позволяет произвести считывание результата измерения температуры объекта излучения в °С. Красный светофильтр 7 пропускает область излучения с шириной около 100 нм и с эффективной длиной волны 650 нм. Данный тип пирометров позволяет измерять температуры в интервале 700...8000°С. Основная допустимая погрешность измерения для интервала температур 1200...2000°С составляет ±20°С.

Достоинством таких приборов является простота и удобство в работе. Недостатком – субъективизм, а также то, что измеряется так называемая яркостная температура, которая отличается от действительной. **Яркостная температура** – условная температура нечерного тела, численно равная такой температуре черного тела, при которой их спектральные энергетические яркости равны. Для определения действительной температуры следует ввести поправку на степень черноты поверхности объекта.

7.13. Цветовые пирометры

Чем выше температура, тем на более высоких частотах идет излучение. Растет значение спектральной энергетической светимости на всех длинах волн, но преимущественно на коротких. Кривая спектра, поднимаясь, одновременно сдвигается в сторону коротких волн. Положение максимума $\lambda_{\text{макс}}$ смещается по правилу $\lambda_{\text{макс}} = \frac{b}{T}$, где b – константа. Это – закон Вина.

При увеличении температуры вместе с ростом интенсивности света или яркости, меняется соотношение различных частотных составляющих (цвет). При увеличении температуры, спектр от инфракрасного переходит в видимый диапазон и тело начинает светиться темно красным цветом (красное каление). Затем в спектре появится оранжевый цвет, затем увеличится доля желтого, зеленого, голубого, синего и фиолетового. Цвет перейдет из темно красного, в красно-оранжевый = светло-красный, затем в красно-оранжево-желтый = рыжий, затем красно-оранжево-желто-зеленый = рыже-желтый, затем в краснооранжево-желто-зелено-голубой = светло-желтый, затем в красно-оранжево-желто-зелено-голубо-синий = очень светло желтый, затем в спектре будут почти равном соотношении все цвета, и цвет станет почти белым (белое каление). Температура рыжего пламени свечи – 1900 К, рыже-желтой нити накаливания – 3200 К, светло-желтой поверхности солнца – 5600 К.

Таким образом, цвет нагретого объекта зависит от его температуры. Приборы, основанные на использовании данной закономерности называются **цветовые пирометры**. Они определяют температуру по отношению светимостей для фиксированных длин волн излучения. Это отношение однозначно зависит от положения максимума спектральной энергетической светимости, а значит и от температуры. Схема цветового пирометра приведена на рис. 7.19.

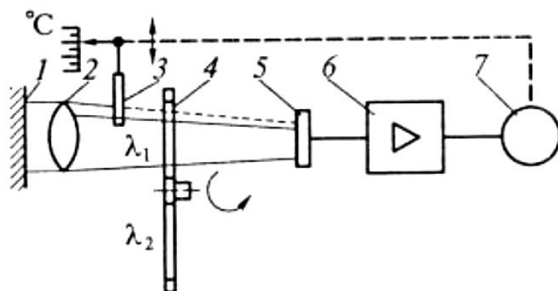


Рис. 7.19. Функциональная схема цветового пирометра:

1 – объект измерения; 2 – объектив; 3 – фильтр; 4 – обтюратор;
5 – фотоэлемент; 6 – усилитель; 7 – реверсивный двигатель

Эти пирометры измеряют цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определенных участках спектра. Основное преимущество таких пирометров заключается в независимости их показаний от излучательной способности объекта, а также от наличия дыма, пыли и испарений в пространстве между объектом и пирометром. Световой поток от объекта измерения **1** прерывается обтюратором **4** с двумя светофильтрами, пропускающими излучение на двух длинах волн λ_1 и λ_2 к фотоэлементу **5**, что вызывает появление на выходе фотоприемника переменного сигнала, амплитуда которого пропорциональна отношению спектральных светимостей входных потоков света. Переменная составляющая выходного сигнала фотоприемника усиливается в усилителе **6** и подается на реверсивный двигатель **7**, который перемещает уравнивающий фильтр **3** до тех пор, пока не уравниваются интенсивности излучения на обеих длинах волн. В положении равновесия переменная составляющая выходного сигнала фотоприемника исчезает, а перемещение фильтра **3** является мерой измеряемой температуры.

Диапазон измерения от 1000 до 2500°C. При использовании инфракрасных фотоприемников нижний предел температурного диапазона может быть уменьшен до 20...50°C. Достоинством таких приборов является то, что для «серых» тел измеряется действительная температура. Напом-

ним, что серым называется тело, степень черноты поверхности которого можно принять постоянной в широком диапазоне длин волн излучения.

7.14. Радиационные пирометры (полного излучения)

Принцип действия **радиационных пирометров** основан на использовании зависимости полной (интегральной) светимости теплового излучения тела от температуры, описываемой формулой Стефана-Больцмана. Схема радиационного пирометра приведена на рис. 7.20.

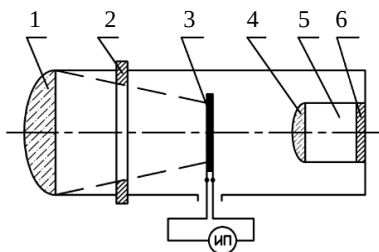


Рис. 7.20. Схема радиационного пирометра:

1 – линза объектива; 2 – диафрагма; 3 – термобатарея; 4 – окуляр;
5 – визирное устройство; 6 – защитное стекло

Приборы такого типа широко используют для измерения как низких температур $-20...+100^{\circ}\text{C}$ так и высоких от 400°C до 3500°C . 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. В качестве приемников применяются термобатареи или болометры.

Термобатареи – последовательно соединенные термопары до 20 шт. Их горячие спаи 1 (см. рис. 7.21) располагаются в центре круга и зачерняются, на них фокусируется излучение.

Болометры – это термометры сопротивления, изготовленные в виде тонкослойных полупроводниковых термисторов. Они применяются для идентификации мощных сигналов, например лазерного излучения.

Пирозлектрические приемники – это кристаллы с определенным видом симметрии, в которых в зависимости от изменения температуры проявляется эффект спонтанной поляризации. Пирометры полного излучения подразделяются на пирометры с преломляющей оптической системой (рис. 7.22 а) и пирометры с отражающей оптической системой (рис.

7.22 б). В первом случае излучение от объекта измерения 1 через линзовый объектив 2 и диафрагму 3 поступает на приемник полного излучения 4. Для наводки на объект измерения служит окуляр 6 с дымчатым светофильтром 5 и диафрагмой 7. Отсчетным устройством является милливольтметр 8.

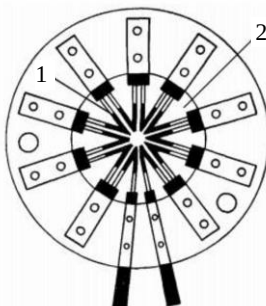


Рис. 7.21. Конструкция термобатарей

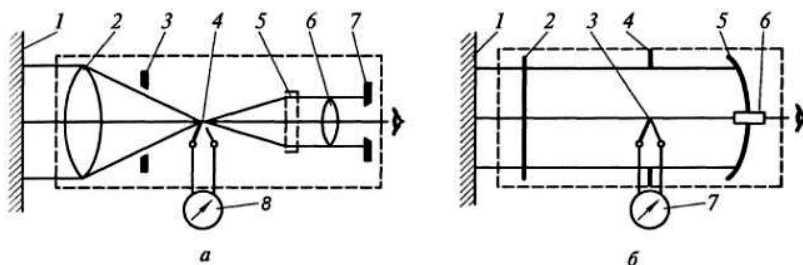


Рис. 7.22. Схема пирометров полного излучения

В пирометрах с отражающей оптической системой (рис. 7.22 б) излучение от объекта измерения 1 попадает на приемник излучения 3 после прохождения через защитную полиэтиленовую пленку 2, диафрагму 4 и зеркальный объектив 5. Для наводки на объект излучения служит зрительная труба 6. Отсчет показаний производится по шкале милливольтметра 7. Полиэтиленовая пленка прозрачна для инфракрасного излучения и служит для защиты оптической системы пирометра от загрязнения потоков воздуха.

7.15. Тепловизоры

Пирометры позволяют измерять температуру локальной точки объекта контроля. Для визуализации температурных полей применяют тепловизоры.

Принцип действия сканирующего тепловизора (см. рис 7.23) заключается в просмотре по заданному закону движения поверхности объекта узким лучом, сформированным оптической системой. По такому же принципу происходит перемещение луча по экрану телевизора. При этом интенсивность луча и яркость изображения зависит от сигнала приемника ИК-лучей, который в свою очередь зависит от температуры участка поверхности объекта. Таким образом, на экране монитора получают области с различной градацией яркости, которые и составляют тепловое изображение объекта.

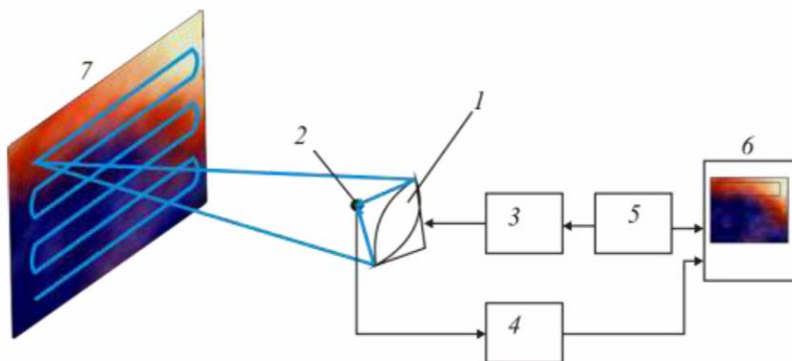


Рис. 7.23. Структурная схема сканирующего тепловизора:

1 – приемная оптическая система; 2 – приемник ИК лучей;
3 – сканирующая система; 4 – усилитель; 5 – система синхронизации и
развертки; 6 – монитор; 7 – поверхность объекта контроля

Детектором тепловизоров является матрица из неохлаждаемых и охлаждаемых жидким азотом микроболометров, на которую проецируется изображение объекта. По сигналам совокупности микроболометров, преобразованным в цифровой вид восстанавливается тепловое изображение объекта и осуществляются следующие функции:

- совмещается отображение термограммы и видеоизображения;
- изменение уровня температур и чувствительности в режиме стоп-кадра;
- индикация температуры в нескольких точках объекта;
- индикация значения разности температур между двумя точками;
- индикация максимальной/минимальной температуры, измеряемой по всему изображению или по отдельной его части (с фиксацией максимальных значений);
- выделение нескольких областей измерений с индикацией максимальной, минимальной и средней температуры.

Тепловизоры имеют диапазон измерения от -40 до 2000°C и разрешение по температуре $0,1 \dots 0,3^{\circ}\text{C}$. Применяются для контроля за тепловым загрязнением водоемов, для обнаружения утечек горячей воды и пара из тепловых коммуникаций, утечек тепла из зданий и сооружений, локализации мест перегрева агрегатов и электрических сетей.

7.16. Специальные термометры

Акустические термометры. Принцип действия таких термометров основан на зависимости скорости распространения звука в среде от значения термодинамической температуры. Если создать термочувствительный элемент термометра в виде резонатора с газом или жидкостью, то для такой системы будет справедливо уравнение

$$\nu = \sqrt{\frac{RT}{m} \frac{C_p}{C_V}},$$

где ν – скорость распространения звука; R – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; m – масса одного моля газа; C_p , C_V – удельная теплоемкость газа соответственно при постоянных давлении и объеме.

Он содержит первичный преобразователь с газообразным, жидким или твердым термометрическим телом имеющим температуру T , подлежащую измерению и опорный первичный преобразователь, также с таким же термометрическим телом находящимся при известной и постоянной температуре T_0 . Погрешности измерений с помощью акустического термометра в метрологической практике при реализации на резонаторе с гелием составляет $0,001 \dots 0,01$ К в диапазоне $4,2 \dots 300$ К. Для термометра с резонатором из кварца, молибдена, вольфрама или сапфира для промышленного использования погрешность находится в пределах от десятых долей кельвина до 1 % при температурах $300 \dots 3000$ К.

Кварцевый термометр – это термометр, принцип действия которого основан на температурной зависимости собственной резонансной частоты кварцевого пьезоэлемента. Частота f пьезоэлектрического кристалла кварца обладает высокой стабильностью. Температурная зависимость частоты имеет следующий вид: $f(t) = f_0(1 + at + bt^2 + ct^3)$, где t – температура кварца; f_0 – частота при 0°C ; a , b , c – константы, определяемые из эксперимента при различных температурах в ходе совместных измерений.

Основной диапазон применения термометров составляет от -80 до $+250^{\circ}\text{C}$, разрешение достигает 10^{-6} К, частотный диапазон $5 \dots 30$ МГц. Для кварцевого термометра наблюдается гистерезис, достигающий $0,05$ К.

Жидкокристаллический термоиндикатор – это термоиндикатор, содержащий жидкокристаллическое вещество, которое в определенном интервале температур изменяет свою структуру так, что падающий на него свет белого источника отражается с изменением цвета, резко зависящим от температуры. Наиболее ценны как жидкокристаллические термоиндикаторы вещества холестерической структуры. ЖК термоиндикатор при определенной температуре становится красным; потом, нагреваясь до более высокой температуры, он становится оранжевым, затем желтым, зеленым, синим, фиолетовым, т. е. образует различную гамму цветов в зависимости от температуры участков объекта измерений. Жидкие кристаллы реагируют на очень незначительные изменения температуры, иногда в пределах $0,01 \dots 0,1$ К. С их помощью можно визуализировать изменение температурного поля поверхности нагретых тел, ИК и СВЧ излучения, воспалительные очаги в медицине.

7.17. Вопросы для самостоятельной работы

1. Дать определение температуры. Температурные шкалы.
2. Перечислите эффекты, положенные в основу различных принципов измерения температуры.
3. Поясните принципы измерения температуры, реализуемые в стеклянных термометрах.
5. Манометрический принцип измерения температуры.
6. Что происходит с твердыми телами при воздействии на них температуры?
7. Поясните принципы измерения dilatометрическими термометрами. Что такое биметаллические термометры,
8. Какое явление положено в основу термоэлектрического принципа измерения температуры?
9. Как выполняется компенсация температуры холодных спаев термомпар?
10. Поясните физические основы действия термопреобразователей сопротивления.
11. Как изменяется электрическое сопротивление металла при изменении температуры?
12. Что такое терморезисторы и позисторы?
13. Приведите схемы включения термопреобразователей сопротивления.
14. Использование теплового излучения в целях измерения температуры. Приведите физические основы.
15. Поясните физические основы действия яркостных, цветовых и радиационных пирометров.

8. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

8.1. Электромеханические приборы

8.1.1. Структурная схема приборов прямого действия

Большая группа используемых в настоящее время приборов построена с использованием электромеханических преобразователей.

Все эти приборы преобразуют измеренную электрическую величину в механическую величину, удобную для оценки и измерения. Электромеханические приборы применяют для измерения тока, напряжения, мощности, частоты, фазовых сдвигов, сопротивлений и других электрических величин.

В автомобильном транспорте применяются для измерения неэлектрических величин преобразованных в электрический сигнал, например температура, давление, уровень, скорость, число оборотов и т.д. Структурная схема приборов прямого действия может быть представлена в виде, представленном на рис. 8.1.

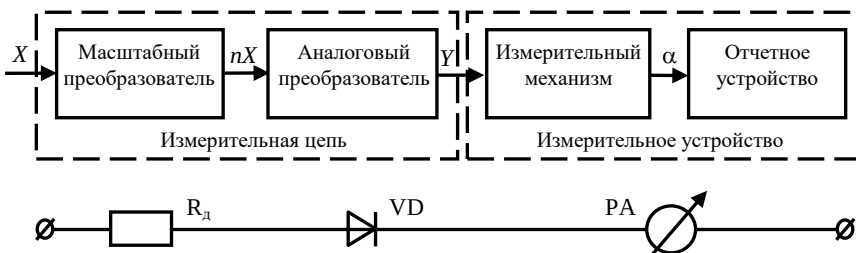


Рис. 8.1. Структурная схема приборов прямого действия

Измерительная цепь прибора обеспечивает преобразование электрической измеряемой величины x в некоторую промежуточную величину Y (ток или напряжение), функционально связанную с измеряемой величиной x .

Величина Y непосредственно воздействует на измерительный механизм (устройство). Различные измерительные цепи позволяют использовать один и тот же измерительный механизм для измерения разнородных величин: напряжения, тока, сопротивления.

Измерительный механизм является основной частью конструкции прибора и преобразует электромагнитную энергию в механическую, необходимую для отклонения на угол α подвижной части, т.е. выполняет преобразование: $\alpha = f[Y(x)] = F(x)$

8.1.2. Магнитоэлектрические приборы

Принцип действия их основан на взаимодействии поля постоянного магнита и поля контура с током. Измерительные механизмы таких приборов выполняют с подвижной рамкой (рис 8.2 а, б) или с подвижным магнитом (рис 8.2 в).

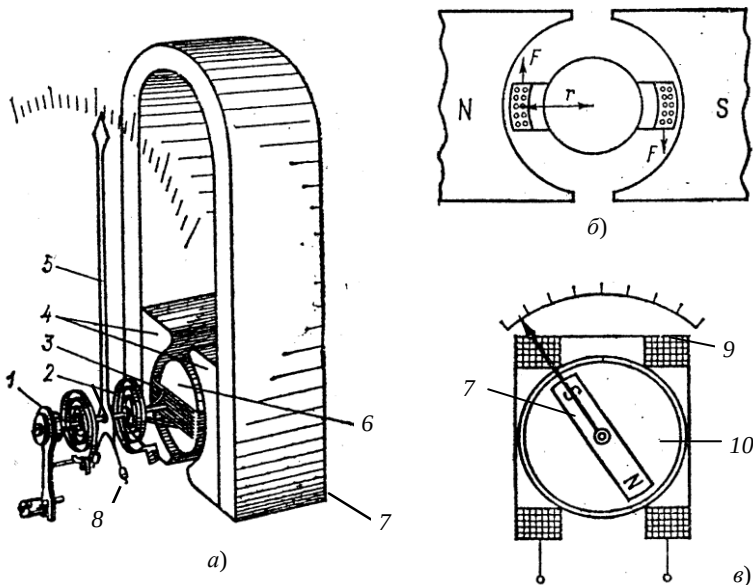


Рис. 8.2. Магнитоэлектрические приборы:

1 – корректор; 2 – две спиральные пружины, служащие для подвода тока к рамке и для создания противодействующего момента; 3 – рамка из тонкого провода, намотанного на алюминиевом каркасе; 4 – полюсные наконечники, образующие однородное радиальное магнитное поле; 5 – стрелка; 6 – стальной цилиндр; 7 – постоянный магнит; 8 – грузики для балансировки подвижной части прибора; 9 – неподвижная катушка; 10 – медный или алюминиевый стакан, выполняющий функции магнитоиндукционного успокоителя

Уравнение шкалы магнитоэлектрических приборов имеет вид:

$$\alpha = \frac{B \cdot w \cdot F}{K_{np}} I = S \cdot I,$$

где α – угол поворота стрелки; B – магнитная индукция в воздушном зазоре; w – число витков катушки; $F = b \cdot l$ – активная площадь катушки (b – ширина, l – длина каркаса); K_{np} – жесткость спиральных пружин (коэффициент пропорциональности).

$$S = \frac{B \cdot w \cdot F}{K_{np}} - \text{чувствительность прибора по току};$$

Видно, что шкала магнитоэлектрических приборов – линейна.

Достоинства магнитоэлектрических приборов с подвижной катушкой:

1. высокая чувствительность;
2. высокая точность;
3. линейность шкалы.

Достоинства магнитоэлектрических приборов с подвижным магнитом:

1. большой диапазон измеряемых величин;
2. малые габариты;
3. меньшая стоимость.

8.1.3. Магнитоэлектрические логометры

Магнитоэлектрический механизм с двумя катушками (рамками), укрепленными на одной оси называют *логометром*, рис 8.3.

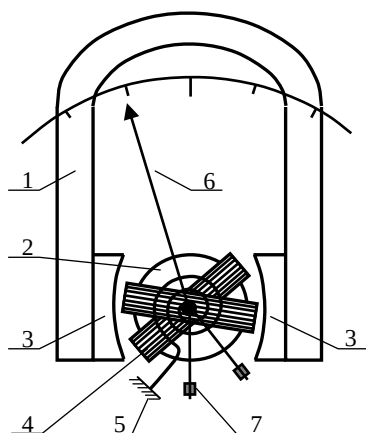


Рис. 8.3. Магнитоэлектрический логометр:

1 – постоянный магнит; 2 – стальной цилиндр, сердечник; 3 – полюсные наконечники; 4 – две рамки; 5 – три спиральные пружины; 6 – стрелка; 7 – грузики

Особенностью устройства логометра по сравнению с однорамочным магнитоэлектрическим прибором является следующее:

1) Воздушный зазор между полюсными наконечниками 3 и сердечником 2 неравномерный, поэтому магнитная индукция B в воздушном зазоре распределяется неравномерно (в центре больше, по краям меньше);

2) Подвижная часть содержит две рамки 4, установленные жестко под определенным углом по отношению друг к другу;

3) Спиральные пружины установлены так, чтобы их моменты взаимно компенсировались, т.е. пружинки 5 противодействующий момент не создают, а используются в качестве безмоментного токоподвода. Направление токов в рамках выбрано так, чтобы их моменты были направлены в разные стороны:

$$M_1 = B_1(\alpha) F_1 w_1 I_1 \quad \text{и} \quad M_2 = B_2(\alpha) F_2 w_2 I_2.$$

Под действием этих моментов подвижная часть прибора поворачивается в сторону большего момента до их уравнивания за счет перемещения рамки с большим током в область с меньшей магнитной индукцией, а рамки с меньшим током в область зазора с большей магнитной индукцией.

В состоянии равновесия $M_1 = M_2$, тогда

$$B_1(\alpha) F_1 w_1 I_1 = B_2(\alpha) F_2 w_2 I_2, \quad \text{откуда}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2(\alpha) F_2 w_2}{B_1(\alpha) F_1 w_1} = \frac{K_2 B_2(\alpha)}{K_1 B_1(\alpha)} = K \frac{B_2(\alpha)}{B_1(\alpha)} = K f(\alpha).$$

$$\text{Следовательно, угол поворота } \alpha = \varphi\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \approx S \frac{I_1}{I_2}.$$

Применяется для измерения сопротивления и в мегомметрах.

Достоинство – показания не зависят от напряжения питания. Это позволяет их использовать в автомобиле для измерения температуры и уровня топлива.

8.1.4. Электромагнитные приборы

Принцип электромагнитных приборов основан на взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки 1 (см. рис. 8.4), обтекаемой измеряемым током, с подвижным ферромагнитным сердечником 2, эксцентрично укрепленным на оси 3. Противодействующий момент создается спиральной пружиной 4. В механизме используются воздушные, жидкостные или индукционные успокоители.

$$\text{Уравнение шкалы прибора имеет вид } \alpha = \frac{1}{2K_{np}} \frac{dL}{d\alpha} I^2,$$

где L – индуктивность катушки; I – ток в рамке; K_{np} – удельный противодействующий момент.

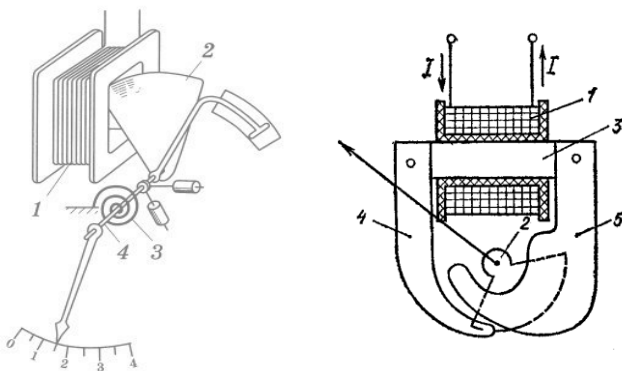


Рис. 8.4. Электромагнитные приборы

Из уравнения видно, что электромагнитные приборы имеют неравномерную шкалу (квадратичную). Однако выбором формы сердечника 2 удастся приблизить шкалу к равномерной начиная с 15...20% от конечного значения. При работе ЭМ прибора на переменном токе его показания несколько занижены, чем при измерении в цепи постоянного тока, из-за потери на перемагничивание сердечника. На работу электромагнитных приборов действуют внешние магнитные поля, особенно если они действуют по оси катушки и совпадают по частоте. Уменьшить их удастся экранированием прибора или его *астатированием*.

8.2. Выпрямительные измерительные приборы

Для преобразования переменного тока в постоянный в них используются диоды. Различают одно или двухполупериодные выпрямители.

8.2.1. Однополупериодная схема выпрямительного прибора

Ток через измерительный механизм ИМ выпрямительного прибора (см. рис. 8.5) проходит в течение положительного полупериода по цепи VD_1 , ИМ. Отрицательный полупериод проходит через цепь VD_2 , R, сопротивление которого должно быть равно сопротивлению VD_1 , ИМ, чтобы сопротивление прибора в оба полупериода было одинаковым.

Вследствие инерционности подвижной части прибора значение угла поворота стрелки α определяется средним значением тока $I_{ср}$, протекающего через ИМ. Уравнение шкалы выпрямительного прибора по однополупериодной схеме имеет вид:

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{B \cdot w \cdot F}{K_{np}} I_{cp} = \frac{1}{2} S \cdot I_{cp},$$

где B – магнитная индукция в зазоре; $F = b l$ – площадь катушки; w – число витков; K_{np} – коэффициент пропорциональности или противодействующий момент, определяемый жесткостью пружины.

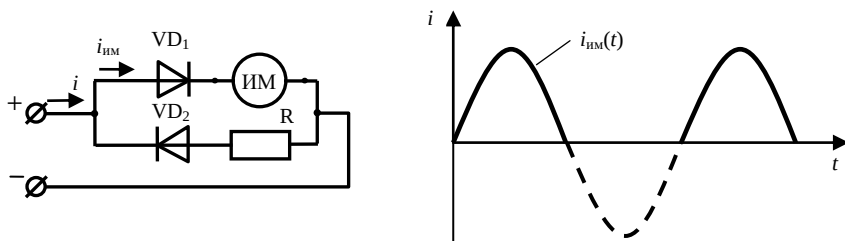


Рис. 8.5. Однополупериодная схема и график тока

Обычно выпрямительные приборы градуируют в действующих значениях измеряемых величин. Для этого надо учесть коэффициент формы кривой тока:

$$K_{\phi} = \frac{I}{I_{cp}} = 1,11, \text{ так как } I_{cp} = \frac{I}{K_{\phi}},$$

тогда
$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{B \cdot w \cdot F}{K_{np}} \frac{I}{K_{\phi}} = 0,45 \cdot \frac{B \cdot w \cdot F}{K_{np}} I.$$

8.2.2. Двухполупериодная схема выпрямительного прибора

Двухполупериодные выпрямительные приборы строят с использованием мостовых схем (рис. 8.6).

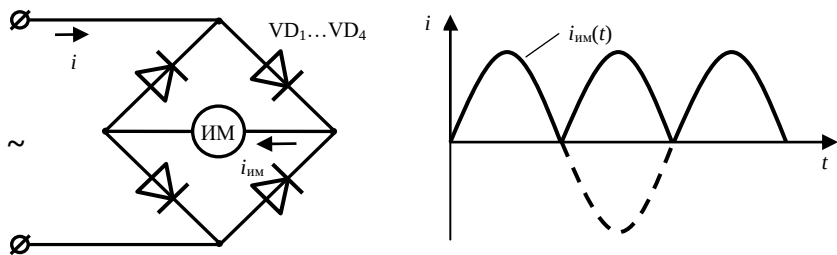


Рис. 8.6. Двухполупериодная схема и график тока

В этом случае через измерительный механизм (ИМ) протекает ток $i_{им}$ в два раза больший, чем в однополупериодной схеме. Угол поворота подвижной части с учётом коэффициента формы $K_\phi = \frac{I}{I_{cp}} = 1,11$ определяется как

$$\alpha = 0,9 \cdot \frac{B \cdot w \cdot F}{K_{np}} I,$$

где I – действующее значение тока.

Мостовую схему прибора собирают из 4-х строго идентичных диодов. Если диоды неодинаковы, то показания прибора начинают зависеть от температуры окружающей среды. Для уменьшения температурной неустойчивости схемы выпрямления часто собирают из двух диодов и двух резисторов (см. рис. 8.7).

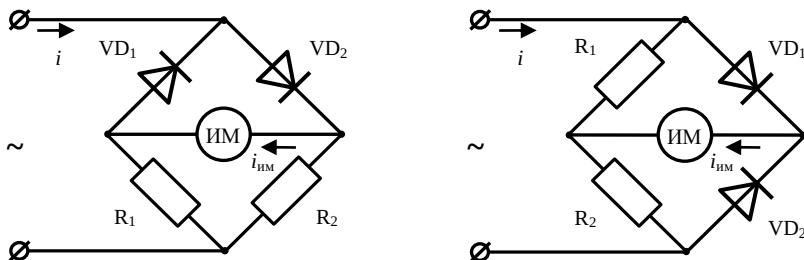


Рис. 8.7. Варианты двухполупериодных схем

Частотный диапазон приборов по этим схемам составляет от 10 Гц до 100 кГц с плоскостными и до 100 МГц с высокочастотными точечными диодами.

Достоинства выпрямительных приборов: высокая чувствительность, малое собственное потребление, широкий частотный диапазон.

8.3. Схемы включения электроизмерительных приборов

При измерении электрических величин необходимо правильно включать электроизмерительные приборы.

Для измерения ЭДС, следует выбирать вольтметр с высоким сопротивлением, порядка $R_v > 1 \text{ МОм}$. Это вызвано тем, что напряжение под нагрузкой $U = \frac{\varepsilon}{(1 + r/R)}$ всегда меньше ε и поэтому ЭДС не может быть из-

мерена точно с помощью вольтметра, у которого хотя и велико, но всегда конечное значение сопротивления R_v . Поэтому измерение вольтметром

будут включать погрешность, зависящую от R_V . Как правило эта погрешность лежит в пределах погрешности вольтметра. Вольтметр подключается параллельно источнику, рис. 8.8 а.

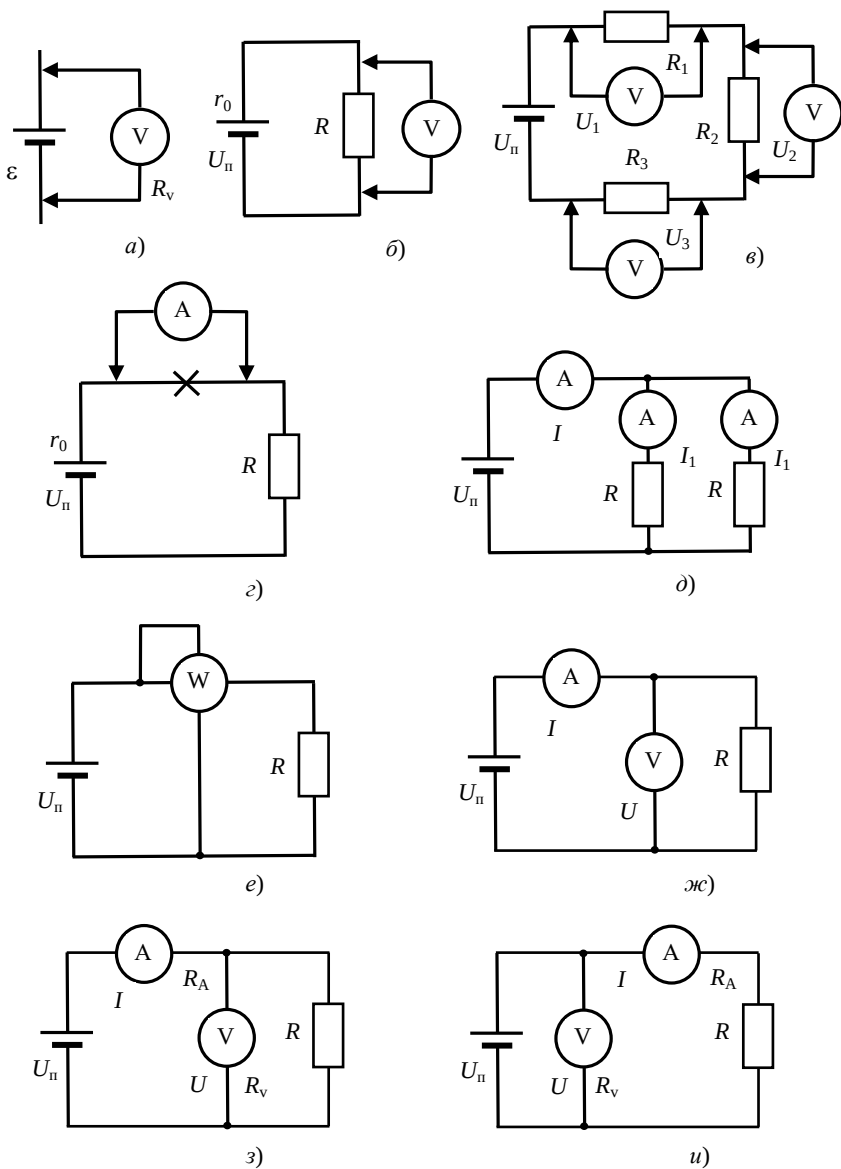


Рис. 8.8. Схемы включения электроизмерительных приборов

Для измерения падения напряжения на нагрузке R вольтметр подключается к этой нагрузке, рис. 8.8 б. При этом $U_n < \varepsilon$ и $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$.

Если необходимо измерить падение напряжения на нескольких последовательно включенных резисторах, то вольтметр подключается последовательно к каждому резистору, рис. 8.8 в и тогда $U_n = U_1 + U_2 + U_3$.

При измерении тока амперметр включается последовательно сопротивлению нагрузки, рис. 8.8 г, д. Соотношение между током и напряжением определяется по закону Ома для полной цепи $I = \frac{U_n}{R + r}$. Если несколько параллельно включенных нагрузок, то $I = I_1 + I_2$.

Мощность можно измерить ваттметром непосредственно включив его к нагрузочному сопротивлению, рис. 8.8 е. Можно также измерить мощность с помощью амперметра и вольтметра, рис. 8.8 ж, рассчитав затем $P = U \cdot I$.

Сопротивление резистора R можно измерить с помощью амперметра и вольтметра, но при $R < 100$ Ом, следует использовать схему, рис. 8.8 з, а при $R > 100$ Ом, следует использовать схему, рис. 8.8 и, рассчитав затем сопротивление по закону Ома $R = U/I$.

Если сопротивления амперметра R_A и вольтметра R_V известны? То можно использовать любую схему и вносить поправки на R_A и R_V .

В этом случае расчетные формулы для R будут иметь вид:

$$\text{Для схемы рис. 8.8 з } R = \frac{U_v}{I_A - U_v / R_v},$$

$$\text{Для схемы рис. 8.8 и } R = \frac{U_v - I_A R_A}{I_A}.$$

8.4. Принцип действия приборов сравнения

Принцип их действия основан на сравнении измеряемой величины с величиной, значение которой известно. При этом измеряемую величину можно измерять двумя способами:

а) отсчетом при полном уравнивании (компенсация) неизвестной величины x ее мерой.

б) отсчетом по прибору, измеряющему разность между измеряемой величиной x и ее мерой.

Приборы сравнения отличаются высокой точностью, но и сложностью обслуживания. В качестве приборов сравнения используют мосты и компенсаторы (потенциометры). В уравновешенном режиме погрешность мостовых схем составляет $\delta = 0,01 \%$, в неуравновешенном режиме $-\delta = 0,5 \%$.

8.4.1. Одинарный мост постоянного тока

Одинарный мост постоянного тока – это четырехполюсник составленный из активных резисторов, рис. 8.9.

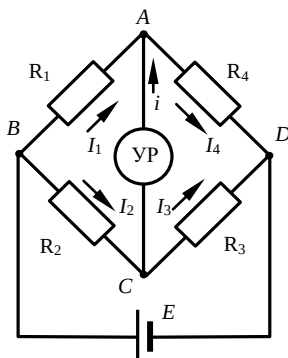


Рис. 8.9. Одинарный мост постоянного тока

Здесь AC – измерительная диагональ в которую включен указатель равновесия $УР$, DB – питающая диагональ, R_1, R_2, R_3, R_4 – плечи моста.

При равновесии моста $U_{AC} = 0$, что возможно при $U_{AB} = U_{CB}$ и $U_{DA} = U_{DC}$ или $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$ и $I_4 \cdot R_4 = I_3 \cdot R_3$.

С учетом того, что в состоянии равновесия $i = 0$, получим $I_1 = I_4$, $I_2 = I_3$ т.е. $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$ и $I_1 \cdot R_4 = I_2 \cdot R_3$.

Поделим эти равенства и получим условие равновесия моста в виде

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad \text{или} \quad R_1 R_3 = R_2 R_4,$$

т.е. одинарный мост постоянного тока находится в равновесии, если равны произведения его противоположных плеч.

$$\text{Если обозначить } R_1 = R_x, \quad R_2 = R_{\text{обр}} \quad \text{то} \quad R_x = R_{\text{обр}} \frac{R_4}{R_3},$$

где R_3, R_4 – называют плечами отношения, $R_{\text{обр}}$ – плечо сравнения.

$$\text{Абсолютная чувствительность моста } S_{Mabc} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta R_x}.$$

где $\Delta \alpha$ – отклонение $УР$.

8.4.2. Двойной мост постоянного тока

Мост называют двойным или шестиплечим (рис. 8.10). В таком мосте основные токоведущие контакты находятся вне основной измерительной схемы.

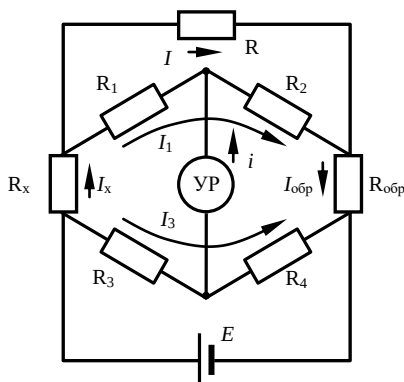


Рис. 8.10. Одинарный мост постоянного тока

Условие равновесия двойного моста имеет вид:

$$R_x = R_{обр} \cdot \frac{R_1}{R_2} + \frac{R(R_1 R_4 - R_2 R_3)}{R_2(R_3 + R_4 + R)}. \quad (8.1)$$

При изготовлении моста обеспечивают постоянное значение отношение плеч $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ (*), часто даже требует $R_1 = R_3$, $R_2 = R_4$, что обеспечивается применением сдвоенных переключателей. В этом случае из отношения (*) следует $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \rightarrow R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3 = 0$, т.е. все второе слагаемое в формуле (8.1) обращается в нуль и условие равновесия для двойного моста такое же, как и для одинарного $R_x = R_{обр} \frac{R_1}{R_2}$.

Так как точная подгонка сопротивлений практически недостижима, следовательно $R_1 R_4 - R_2 R_3 = 0$. Поэтому сопротивление R берут очень малой величины, в виде короткого провода большого сечения, и сводит погрешность к минимуму.

Используется для измерения малых значений сопротивлений. Область измерения от $10^{-10} \dots 10^{-5}$ Ом до $1 \dots 10$ Ом.

Выпускаемые промышленностью мосты обозначают так:

МО – мост одинарный (МО-62);
МД – мост двойной;
МОД – мост одинарно-двойной.

8.5. Электронно-лучевые осциллографы

Это приборы для визуального наблюдения электрических процессов, непосредственно в форме напряжения, а также для измерения различных параметров сигналов. Основным элементом осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) с электростатическим управлением луча и люминесцентным экраном. По точности воспроизведения сигнала измерения временных и амплитудных значений прибор относится к 3 классу точности.

Осциллографы позволяют:

1. Определять мгновенные значения сигналов;
2. Определять форму измеряемого сигнала;
3. Определять временные характеристики элементов схем;
4. Измерять фазовый сдвиг между различными сигналами;
5. Измерять частоту (сравнением с образцовым сигналом) и т.д.

8.5.1. Классификация осциллографов

Классификация по назначению и принципу действия:

1. *Универсальные осциллографы* – это электронно-лучевые осциллографы, в которых исследуемый сигнал подается на вертикально отклоняющую систему, а горизонтальное отклонение осуществляется генератором развертки.

2. *Стробоскопические осциллографы* – это электронно-лучевые осциллографы, использующие для изображения формы сигнала отбор мгновенных значений в разные моменты времени. Позволяют просматривать импульсы малой длительности без расширения полосы частот усилителей осциллографа.

3. *Запоминающие осциллографы* – это электронно-лучевые осциллографы, сохраняющие на экране или в запоминающем устройстве форму исследуемого сигнала, необходимого для многократного наблюдения или обработки.

4. *Специальные осциллографы* – вычислительные, цифровые с АЦП, скоростные, для телевизионных измерений и т.д.

По числу одновременно наблюдаемых сигналов:

1. *Однолучевые* – имеющие только один управляемый луч.
2. *Многолучевые* – имеющие два и более отдельно управляемых лучей.

3. *Многоканальные* – со специальным коммутирующим устройством, позволяющим изображение 2-х и более сигналов. Переключение каналов осуществляется двумя способами:

- развертка последующего сигнала после полной развертки предыдущего;
- поочередное переключение каналов в течение развертки периода сигнала.

Существуют также электронно-лучевые осциллографы (ЭЛО) со сменными блоками, позволяющими расширить функциональные возможности.

8.5.2. Структурная схема универсального осциллографа

Структурная схема универсального электронно-лучевого осциллографа показана на рис. 8.11.

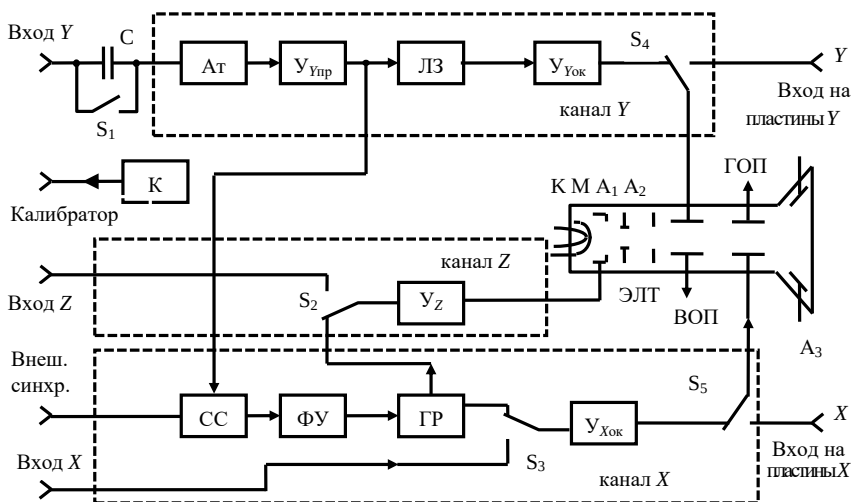


Рис. 8.11. Структурная схема универсального осциллографа

Универсальный электронно-лучевой осциллограф состоит из следующих составных частей:

- входного аттенюатора (Ат);
- предварительного каскада усилителя вертикального отклонения луча ($Y_{Упр}$);
- линии задержки (ЛЗ);
- оконечного каскада усилителя вертикального отклонения луча ($Y_{Уок}$);

- калибратора амплитуды и времени (К);
- селектора синхронизации (СС);
- формирующего устройства (ФУ);
- генератора развертывающего пилообразного напряжения (ГР);
- оконечного выходного усилителя горизонтальной развертки ($Y_{\text{ок}}$);
- усилителя управления яркостью луча (Y_z);
- электронно-лучевой трубки (ЭЛТ);
- узла питания.

8.6. Цифровые измерительные приборы и аналогово-цифровые преобразователи

В цифровых измерительных приборах (ЦИП) происходит автоматическое преобразование входной измеряемой величины в цифровой код, индицируемый на цифровом отсчетном устройстве. ЦИП имеют возможность передачи цифрового кода в ЭВМ или в измерительно-информационную систему (см. рис. 8.12).

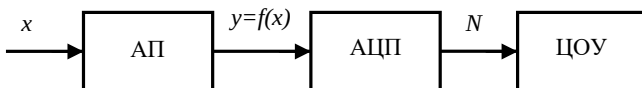


Рис. 8.12. Структурная схема ЦИП

АП – аналоговый преобразователь измеряемой величины x в величину y , более удобную для выбранного метода кодирования (в простейшем случае АП изменяет только масштаб x).

АЦП – аналого-цифровой преобразователь аналоговой величины y в цифровой код N .

ЦОУ – цифровое отсчетное устройство.

8.6.1. Классификация цифровых измерительных приборов

Классификация ЦИП и ЦВ

1. По роду измеряемой величины различают следующие виды ЦИП: вольтметры, амперметры, омметры, частотомеры, фазометры, мосты и т.д. Применяются и комбинированные ЦИП.

2. По области применения различают лабораторные и щитовые ЦИП.

Среди ЦИП особое место занимают цифровые вольтметры, которые классифицируют:

1. По способу преобразования непрерывной величины в дискретную различают ЦВ с кодоимпульсным (поразрядным кодированием, взвешиванием), с время- и частотно-импульсным преобразованием.

2. По структурной схеме АЦП ЦВ делятся на вольтметры прямого (где отсутствует обратная связь) и уравнивающего преобразования (где имеется обратная связь измеряемой величины с дискретной выходной).

3. По способу уравнивания ЦВ делятся на вольтметры со следящим и развертывающим уравниванием. При следящем уравнивании измеряемая величина непрерывно сравнивается с компенсирующей, которая изменяется до тех пор, пока не достигает их равенства. При развертывающем уравнивании компенсирующее напряжение изменяется от нуля до максимального значения и прекращает это изменение при их равенстве.

8.6.2. Цифровой измерительный прибор для измерения частоты

Основан на использовании метода последовательного счета. Структурная схема и временная диаграмма показана на рис. 8.13.

В состав цифрового частотомера входят:

Ф – формирователь, преобразующий входной периодический сигнал U_x, f_x в последовательность коротких импульсов, например при изменении знака сигнала с “–” на “+”;

ВС – временной селектор;

СИ – счетчик импульсов;

Дш – дешифратор;

ЦОУ – цифровое отсчетное устройство;

ГИ – генератор импульсов стабильной частоты $f_T = 1$ или 5 МГц (кварцевый);

ДЧ – делитель частоты,

Т – триггер, на выходе которого формируется импульс U_2 положительной полярности длительностью T_0 .

Количество импульсов N , прошедших через открытый временной селектор ВС за время T_0 , подсчитывается счетчиком СИ. Двоичный код счетчика преобразуется в двоично-десятичный, дешифратором Дш и иницируется на ЦОУ.

Число импульсов N , посчитанное счетчиком СИ равно

$$N = \frac{T_0}{T_x} = T_0 \cdot f_x$$

Если $T_0 = 1с$, то $N = 1 \cdot f_x$ – непосредственно дает значение измеряемой частоты.

В практических схемах частотомеров значения T_0 можно задавать из ряда $T_0 = 10^m$, где $m = -3, -2, -1, 0, 1, 2$.

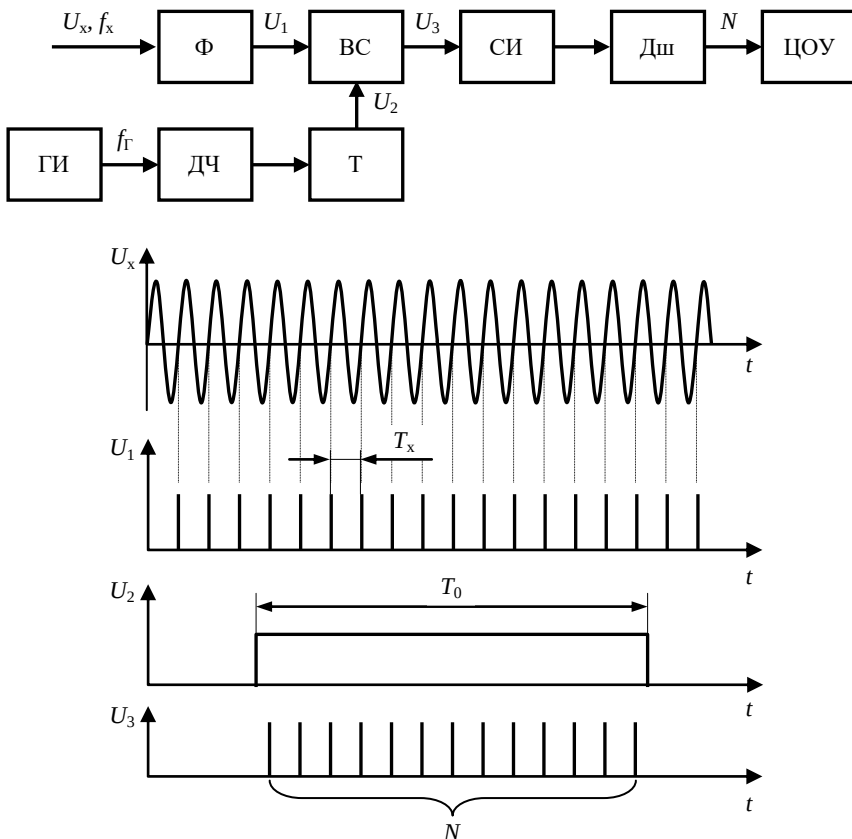


Рис. 8.13. Структурная схема цифрового частотомера

Для сигналов с низкой частотой проще и точнее измерять период.

8.6.3. Цифровые вольтметры с времяимпульсным преобразованием

Основан на предварительном преобразовании измеряемого напряжения U_x в интервал времени Δt , который последовательно кодируется методом последовательного счета. Этот принцип использован в вольтметрах ВК7-10А, В7-20. Структурная схема и временная диаграмма показана на рис. 8.14.

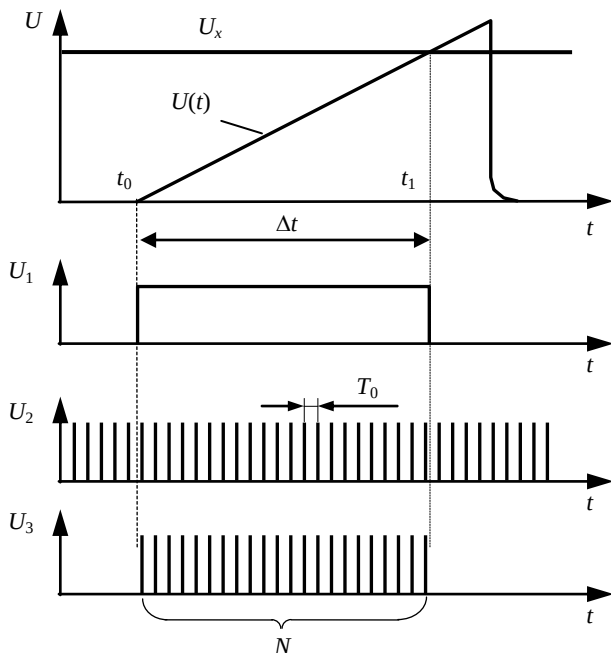
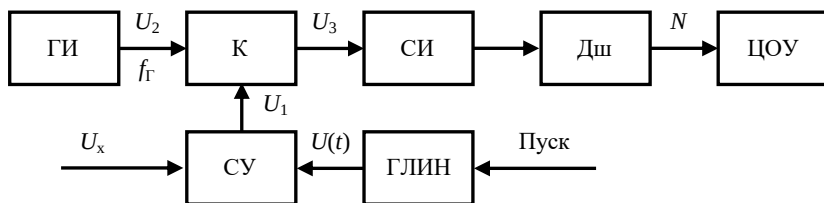


Рис. 8.14. Структурная схема цифрового вольтметра

Преобразование U_x в Δt происходит посредством сравнения U_x с линейно изменяющимся $U(t)$. На входы сравнивающего устройства СУ подаются U_x и $U(t)$ с выхода генератора линейно-изменяющегося напряжения ГЛИН. В момент времени t_0 происходит запуск ГЛИН, а на выходе СУ вследствие $U_x > U(t)$ появляется U_1 равный логической единице, отрывающий ключ К, через который импульсы с генератора ГИ поступают на счетчик импульсов СИ. В момент t_1 когда $U(t_1) = U_x$, сигнал U_1 сбрасывается, при этом ключ К закрывается и прекращает подачу импульсов на счетчик СИ.

Число импульсов насчитанных СИ, частота которых выбирается 0,8...1 МГц, равно $N = \frac{\Delta t}{T_0} = K \cdot U_X$ – пропорционально измеряемому напряжению U_X .

Погрешность прибора зависит от линейности и скорости изменения напряжения $U(t)$, стабильности ГИ и чувствительности СУ.

Недостаток – влияние различных помех на результат преобразования, особенно частотой 50 Гц. Для борьбы с этим на входе ставят фильтры, хотя они снижают быстродействие.

8.7. Вопросы для самостоятельной работы

1. Как устроен и из каких частей состоит измерительный механизм электромеханических приборов ?
2. В чем заключается принцип действия электроизмерительных механизмов магнитоэлектрической системы ?
3. Принцип действия приборов электромагнитной системы.
4. Сравнить достоинства и недостатки измерительных механизмов различных систем.
5. Поясните принцип действия выпрямительных измерительных приборов.
6. Какие из рассмотренных в работе систем приборов можно применять для измерений в цепях постоянного тока ?
7. Изобразите схемы включения амперметра, вольтметра, ваттметра и схемы для измерения сопротивления.
8. Поясните принцип действия и работу одинарного моста постоянного тока при измерении сопротивлений.
9. Запишите условие равновесия схемы одинарного моста.
10. Поясните работу двойного моста постоянного тока.
11. По каким признакам классифицируют осциллографы?
12. Объясните устройство и принцип действия электронно-лучевого осциллографа.
13. По каким признакам классифицируют цифровые приборы?
14. Поясните принцип действия цифрового частотомера.
15. Поясните принцип действия цифрового вольтметра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закончив изучение материала предложенного учебного пособия, вы можете убедиться, что физические основы технических измерения являются базой для многих технических дисциплин, связанных с количественной оценкой физических величин, размеров, параметров и т.д. Поэтому время и силы, потраченные на изучение физических основ технических измерений, будут востребованы и найдут применение не только в студенческой практике при изучении специальных дисциплин, но и в будущей профессии. Понимание принципов работы тех или иных средств измерений, физических законов, положенных в их основу, является подтверждением компетентности и высокой квалификации любого специалиста, связанного с техникой и умело пользующегося техническими измерениями. Поэтому знания, полученные при изучении данного материала, позволят пользователю любой измерительной техники полнее использовать функциональные возможности приборов, не ограничиваться инструкцией пользования, а творчески подойти к техническим измерениям, найти альтернативные функциональные возможности используемых методов и средств измерений.

Автор понимает, что представленная работа не охватывает всё многообразие методов и средств измерительной техники, её основ, не претендует на полное изложение современных измерительных приборов, поэтому будет благодарен за замечания и советы читателей данной книги.

В учебном пособии изложен минимальный материал, необходимый современному выпускнику бакалавриата и магистратуры вуза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Учебные пособия

1. **Мищенко, С. В.** Физические основы технических измерений: учеб. пособие / С. В. Мищенко, Д. М. Мордасов, М. М. Мордасов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. Ун-та, 2003. – 175 с.
2. **Кулаков, М. В.** Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 1983. – 462 с.
3. **Клюев, В. В.** Машиностроение: энциклопедия. В 40 т. Т. 3 (7): Измерения, контроль, испытания и диагностика / В. В. Клюев, Ф. Р. Соинин, В. Н. Филинов и др. – М.: Машиностроение, 1996. – 464 с.
4. **Баранов, В. М.** Испытания и контроль качества материалов и конструкций : учеб. пособие для вузов / В. М. Баранов, А. М. Карасевич, Г. А. Сарычев. – М.: Высш. шк., 2004. – 360 с.
5. **Ивлиев, А. Д.** Физика: учебное пособие / А. Д. Ивлиев. – СПб.: Лань, 2008. – 671 с.
6. **Барсуков, В. И.** Физика. Механика: учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2015. – 248 с.
7. **Барсуков, В. И.** Физика. Электричество и магнетизм: учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2009. – 252 с.
8. **Барсуков, В. И.** Физика. Волновая и квантовая оптика: учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 132 с.
9. **Барсуков, В. И.** Молекулярная физика и начала термодинамики: учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2015. – 128 с.
10. **Барсуков, В. И.** Физика. Элементы атомной физики, физики ядра, физики твёрдого тела и жидкости: учебное пособие / В. И. Барсуков, О. С. Дмитриев. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ", 2014. – 112 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ИЗМЕРЕНИЙ	5
1.1. Предмет и задачи курса «Физические основы технических измерений». Роль измерений в НТП	5
1.2. История возникновения и развитие измерений	6
1.3. Основные понятия технических измерений	7
1.4. Система единиц измерения.	8
1.5. Классификация сигналов измерительной информации. Информация, сообщение, сигнал.....	9
1.6. Методы измерения физических величин.....	10
1.7. Классификация средств измерений	12
1.8. Измерительные преобразователи и их классификация.....	13
1.9. Вопросы для самостоятельной работы.....	14
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	15
2.1. Классификация механических величин	15
2.2. Механические средства измерения перемещений, линейных и угловых размеров	15
2.3. Линейки измерительные металлические	17
2.4. Штангенциркуль.....	18
2.5. Микрометр гладкий	20
2.6. Погрешности измерения микрометром	21
2.7. Индикаторы часового типа	23
2.8. Контроль калибрами	25
2.9. Оптико-механические средства измерения длины, переме- щений и размеров	27
2.10. Измерение шероховатостей. Профилометр	31
2.11. Атомно-силовой микроскоп	36
2.12. Сканирующий зондовый микроскоп NanoEducator	39
2.13. Формирование и обработка СЗМ-изображений	43
2.14. Средства измерения линейных размеров и перемещений с электрическим преобразованием	44
2.15. Вопросы для самостоятельной работы.....	57

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЙ.....	58
3.1. Использование законов механики в измерительной технике. Второй закон Ньютона	58
3.2. Классификация средств измерения линейной и угловой скорости. Методы и средства измерения линейных скоростей и скоростей вращения.....	61
3.3. Механические, магнитоиндукционные, электрические и стробоскопические тахометры. Тахогенераторы постоянного и переменного тока	61
3.4. Радары, основанные на использовании эффекта Доплера....	65
3.5. Средства измерения ускорений. Акселерометры	69
3.6. Методы и средства измерения параметров вибраций	71
3.7. Вопросы для самостоятельной работы	77
4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ, ВЕСА И ДАВЛЕНИЯ.....	78
4.1. Использование законов механики при измерении силы и веса	78
4.2. Классификация преобразователей силы. Динамометры на основе упругих элементов	79
4.3. Использование тензорезисторов для измерения силы	82
4.4. Методы измерения массы	88
4.5. Основные типы весов. Механические и электронные весы	89
4.6. Понятие давления. Закон Паскаля	94
4.7. Методы и средства измерения давления	95
4.8. Вопросы для самостоятельной работы	104
5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ.....	105
5.1. Измерение уровня жидкостей. Закон Архимеда	105
5.2. Визуальные, поплавковые, гидростатические и пьезометрические уровнемеры	106
5.3. Электроконтактные, емкостные и радиоволновые уровнемеры	112
5.4. Измерение уровня сыпучих материалов	116
5.5. Вопросы для самостоятельной работы	119
6. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ.....	120
6.1. Элементы механики жидкостей. Измерение расхода.....	120
6.2. Расходомеры переменного перепада давления	121
6.3. Расходомеры постоянного перепада давления	124
6.4. Тахометрические расходомеры	126
6.5. Электромагнитные расходомеры	128

6.6. Ультразвуковые расходомеры	129
6.7. Вопросы для самостоятельной работы	131
7. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ...	132
7.1. Использование в измерительной технике законов термодинамики	132
7.2. Термометры расширения и манометрические термометры	134
7.2.1. Стекланные жидкостные термометры	135
7.2.1. Манометрические термометры	138
7.3. Термометры дилатометрические	140
7.4. Термометры биметаллические	141
7.5. Термоэлектрические преобразователи. Термопары	143
7.6. Типы и характеристики термоэлектрических термометров ..	145
7.7. Физические основы действия термопреобразователей сопротивления	148
7.8. Полупроводниковые терморезисторы	149
7.9. Схемы включения термопреобразователей сопротивления	151
7.10. Цифровые термометры	153
7.11. Физические основы измерения температуры бесконтактным методом	154
7.12. Яркостные пирометры	157
7.13. Цветовые пирометры	158
7.14. Радиационные пирометры (полного излучения)	160
7.15. Тепловизоры	161
7.16. Специальные термометры	163
7.17. Вопросы для самостоятельной работы	164
8. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	165
8.1. Электромеханические приборы	165
8.1.1. Структурная схема приборов прямого действия	165
8.1.2. Магнитоэлектрические приборы	166
8.1.3. Магнитоэлектрические логометры	167
8.1.4. Электромагнитные приборы	168
8.2. Выпрямительные измерительные приборы	169
8.2.1. Однополупериодная схема выпрямительного прибора	169
8.2.2. Двухполупериодная схема выпрямительного прибора	170
8.3. Схемы включения электроизмерительных приборов	171
8.4. Принцип действия приборов сравнения	173

8.4.1. Одинарный мост постоянного тока	174
8.4.2. Двойной мост постоянного тока	175
8.5. Электронно-лучевые осциллографы	176
8.5.1. Классификация осциллографов	176
8.5.2. Структурная схема универсального осциллографа	177
8.6. Цифровые измерительные приборы и аналогово-цифровые преобразователи	178
8.6.1. Классификация цифровых измерительных приборов	178
8.6.2. Цифровой измерительный прибор для измерения частоты	179
8.6.3. Цифровые вольтметры с времяимпульсным преобразованием	180
8.7. Вопросы для самостоятельной работы	182
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	183
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	184

Учебное электронное издание

ДМИТРИЕВ Олег Сергеевич

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Учебное пособие

Редактирование Е. С. Мордасова
Инженер по компьютерному макетированию Т. Ю. Зотова

ISBN 978-5-8265-2532-6



9 785826 525326

Подписано к использованию 30.11.2022.

Тираж 50 экз. Заказ № 94

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

Тел. 8(4752) 63-81-08

E-mail: izdatelstvo@tstu.ru