

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»

В. Д. Вешуткин, А. Е. Жуков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Часть 1

*Допущено Ученым советом Нижегородского государственного
технического университета им. Р.Е. Алексеева в качестве учебного
пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Прикладная механика»*

Нижегород 2016

УДК 531.7.08, 620.1.08

ББК 30.10

В 40

Рецензент

доктор технических наук, профессор В.М. Родюшкин

В 40 Вешуткин, В. Д. Экспериментальная механика: учеб. пособие. **Часть 1** / В. Д. Вешуткин, А. Е. Жуков; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2016. – 83 с.

ISBN 978-5-502-00803-7

ISBN 978-5-502-00804-4 (ч. 1)

Приводятся сведения о методах измерений различных физических величин, основные понятия метрологии, даны основы построения преобразователей неэлектрических величин в электрические, а также классификация и характеристики средств измерений.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Прикладная механика», а также студентов других направлений и специальностей, чья программа обучения предусматривает изучение дисциплины «Экспериментальная механика».

Рис. 51. Табл. 6. Библиогр.: 23 назв.

УДК 531.7.08, 620.1.08

ББК 30.10

ISBN 978-5-502-00803-7

ISBN 978-5-502-00804-4 (ч. 1)

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2016

© Вешуткин В.Д., Жуков А. Е., 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список используемых сокращений.....	5
Предисловие.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ	7
1.1. Термины и определения	7
1.2. Классификация измерений.....	12
1.3. Методы измерений	13
1.4. Погрешности измерения	14
1.5. Обработка результатов измерения	19
1.5.1. Причины возникновения и способы исключения систематических погрешностей	19
1.5.2. Оценка случайных погрешностей.....	20
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ	25
2.1. Общие сведения	25
2.2. Классификация преобразователей неэлектрических величин в электрические	25
2.3. Генераторные преобразователи	27
2.3.1. Индукционные преобразователи	27
2.3.2. Пьезоэлектрические преобразователи.....	30
2.3.3. Термоэлектрические преобразователи	32
2.3.4. Фотоэлектрические преобразователи	34
2.3.5. Электретные преобразователи	35
2.4. Параметрические преобразователи	35
2.4.1. Резистивные преобразователи	35
2.4.2. Индуктивные преобразователи	44
2.4.3. Магнитоупругие преобразователи.....	46

2.4.4. Емкостные преобразователи	49
2.4.5. Преобразователи, основанные на эффекте Холла	52
2.4.6. Ионизационные (радиационные) преобразователи	54
2.4.7. Электронные преобразователи (механотроны)	56
2.4.8. Струнные (виброчастотные) преобразователи	57
2.4.9. Волоконно-оптические преобразователи	60
2.4.10. Электрохимические преобразователи (хемотроны, солионы).....	62
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ	63
3.1. Классификация средств измерений	63
3.2. Характеристики средств измерений	67
3.2.1. Метрологические характеристики средств измерения (статический режим)	67
3.2.2. Сигналы измерительной информации.....	69
3.2.3. Динамические характеристики средств измерения.....	70
3.2.4. Эксплуатационные характеристики средств измерений.....	78
Список литературы.....	81

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

- АЦП — аналого-цифровой преобразователь
АЧХ — амплитудно-частотная характеристика
ИВ — измеряемая величина
ИП — ионизационный преобразователь; измерительный преобразователь; измерительный прибор
КГИ — коэффициент гармонических искажений
КНИ — коэффициент нелинейных искажений
ПИП — первичный измерительный преобразователь
ПП — первичный преобразователь
ПрП — промежуточный преобразователь
РУ — регулирующее (или показывающее) устройство
СИ — средство измерения; также Международная система единиц
ТКС — температурный коэффициент сопротивления
ТР — тензорезистор
ТЭДС — термоэлектродвижущая сила
ФВ — физическая величина, физические величины
ФЧХ — фазочастотная характеристика
ЦАП — цифроаналоговый преобразователь
ЭДС — электродвижущая сила

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одним из основных методов научного исследования является *эксперимент*, или, другими словами, опыт, поставленный с целью изучения какого-либо явления или процесса, проверки научных и прикладных гипотез. Экспериментальные методы позволяют оценить точность численных расчетов, они применяются при разработке математических расчетных моделей, а также при исследовании элементов конструкций, расчет которых сложен или даже невозможен в силу сложности их геометрических или механических характеристик.

Важнейшей частью эксперимента является измерение, а также обработка его результатов. В настоящее время установлено следующее определение измерения: *измерение* — это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерение является едва ли не одним из самых важных путей познания природы человеком. Поэтому в рамках курса экспериментальной механики большое значение уделяется изучению методов измерения различных физических величин, приводятся сведения об основных понятиях метрологии, даются основы построения преобразователей неэлектрических величин в электрические, а также классификация и характеристики средств измерений. Основная цель изучения дисциплины «Экспериментальная механика» заключается в усвоении выпускниками теоретических знаний и выработке практических навыков экспериментальных исследований в области прочности машин, конструкций и их элементов с использованием современных методов измерения неэлектрических величин.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать основы метрологии, характеристики средств измерений, принципы построения преобразователей неэлектрических величин в электрические, методы планирования и организации эксперимента; уметь планировать экспериментальные исследования, проводить их и выполнять обработку экспериментальных данных; владеть навыками работы с современными приборами и системами для измерений и обработки результатов наблюдений, а также навыками выбора необходимых средств измерений для решения задач, поставленных в эксперименте.

Данное пособие соответствует рабочей программе дисциплины «Экспериментальная механика» и предназначено для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки «Прикладная механика». Пособие также может быть полезным для студентов других направлений и специальностей, чья программа обучения предусматривает изучение дисциплины «Экспериментальная механика».

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ

1.1. Термины и определения

Метрология (от греч. μέτρον — мера, и др.-греч. λόγος — мысль, причина) — наука об измерениях физических величин, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов с заданной точностью и достоверностью. Средством метрологии является совокупность измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих требуемую точность.

Метрология состоит из трех разделов.

1. Теоретическая метрология¹ — раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии. Занимается изучением проблем измерений в целом и образующих измерение элементов: средств измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений.

2. Практическая (прикладная) метрология — раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии. В её ведении находятся все вопросы метрологического обеспечения производства.

3. Законодательная метрология — раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц физических величин, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимости точности измерений в интересах общества.

Цели и задачи метрологии:

- создание общей теории измерений;
- образование единиц физических величин и систем единиц;
- разработка и стандартизация методов и средств измерений, методов определения точности измерений, основ обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений (см. *законодательная метрология*);
- создание эталонов и образцовых средств измерений, поверка мер и средств измерений. Приоритетной подзадачей данного направления является выработка системы эталонов на основе физических констант.

¹ Иногда применяют термин «фундаментальная метрология».

Физическая величина (ФВ) — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Измеряемая ФВ (измеряемая величина) — физическая величина, подлежащая измерению, измеряемая или измеренная в соответствии с основной целью измерительной задачи.

Размер ФВ (размер величины) — количественная определенность физической величины, присущая конкретному материальному объекту, системе, явлению или процессу. Размер величины существует реально, независимо от того, знаем мы его или нет. Размер ФВ не зависит от выбора единицы, поэтому выразить размер физической величины можно при помощи любой единицы.

Значение ФВ — выражение размера физической величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Числовое значение ФВ (числовое значение величины) — отвлеченное число, входящее в значение величины. Числовое значение целиком зависит от выбранной единицы.

Истинное значение ФВ (истинное значение величины) — значение физической величины, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину¹.

Действительное значение ФВ (действительное значение) — значение физической величины, полученное экспериментальным путем и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Физический параметр (параметр) — физическая величина, рассматриваемая при измерении данной физической величины как вспомогательная².

Например, при измерении электрического напряжения переменного тока частоту тока рассматривают как параметр напряжения. При измерении мощности поглощенной дозы рентгеновского излучения в некоторой точке

¹ Истинное значение физической величины может быть соотнесено с понятием абсолютной истины. Оно может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений.

² При оценивании качества продукции нередко применяют выражение «измеряемые параметры». Здесь под параметрами, как правило, подразумевают физические величины, обычно наилучшим образом отражающие качество изделий или процессов.

поля этого излучения напряжение генерирования излучения часто рассматривают как один из параметров этого поля.

Влияющая ФВ (влияющая величина) — физическая величина, оказывающая влияние на размер измеряемой величины и (или) результат измерений.

Система физических величин (система величин) — совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин.

Основная ФВ (основная величина) — физическая величина, входящая в систему величин и условно принятая в качестве независимой от других величин этой системы.

Производная ФВ (производная величина) — физическая величина, входящая в систему величин и определяемая через основные величины этой системы.

Размерность ФВ (размерность величины) — выражение в форме степенного одночлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной физической величины с физическими величинами, принятыми в данной системе величин за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1.

Погрешность средства измерения — разность между показанием средства измерений и истинным значением измеряемой физической величины.

Точность средства измерений — характеристика качества средства измерений, отражающая близость его погрешности к нулю.

Лицензия — это разрешение, выдаваемое органам государственной метрологической службы на закрепленной за ним территории физическому или юридическому лицу на осуществление ему деятельности по производству и ремонту средств измерения.

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

Основная единица ФВ — единица основной физической величины, выбранная произвольно при построении системы единиц. Например, основными единицами международной системы единиц (СИ) являются: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела.

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

Система единиц ФВ — совокупность основных и производных единиц, относящаяся к некоторой системе величин и образованная в соответствии с принятыми принципами.

Наиболее распространенная во всем мире и принятая у нас в стране Международная система единиц (СИ) содержит семь основных единиц и две дополнительные. Основные и дополнительные единицы ФВ этой системы приведены в табл. 1.1.

Кратная и дольная единица ФВ — единица в целое число раз больше или соответственно меньше системной или внесистемной единицы. Приставки к дольным единицам приведены в табл. 1.2. Например, километр (1000 м) или сантиметр (0,01 м).

Шкала ФВ — последовательность значений, присвоенная в соответствии с правилами, принятыми по соглашению, последовательности одноименных ФВ различного размера (например, шкала медицинского термометра или весов).

Измерение — нахождение значения ФВ опытным путем с помощью специальных технических средств.

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

Метод измерений — совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

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

Мера — СИ, предназначенное для воспроизведения ФВ заданного размера.

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

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

Измерительная система — совокупность СИ и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенных

для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления (например, система слежения за спутниками).

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

Метрологическая служба — сеть государственных и ведомственных метрологических органов и их деятельность, направленная на обеспечение единства измерений и единообразия СИ в стране.

Единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Таблица 1.1. Основные и дополнительные единицы СИ

Величина	Обозначение величины	Наименование единицы	Обозначение единицы	
			международное	русское
<i>Основные</i>				
Длина	<i>L</i>	метр	m	м
Масса	<i>M</i>	килограмм	kg	кг
Время	<i>T</i>	секунда	s	с
Сила тока	<i>I</i>	ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	<i>N</i>	моль	mol	моль
Сила света	<i>J</i>	кандела	cd	кд
<i>Дополнительные</i>				
Угол		радиан	rad	рад
Телесный угол		стерадиан	sr	ср

Таблица 1.2. Приставки и множители для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований (СИ)

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

1.2. Классификация измерений

По способу получения измерения

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

Косвенное измерение — измерение, проводимое косвенным методом, при котором искомое значение ФВ находят на основании результата прямого измерения другой ФВ, функционально связанной с искомой величиной известной зависимостью между этой ФВ и величиной, получаемой прямым измерением. (Например, определение площади, объема с помощью измерения длины, ширины, высоты; электрической мощности методом измерения силы тока и напряжения и т. д.)

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

Совместные измерения — одновременно проводимые измерения двух или нескольких *не одноименных* физических величин для определения зависимости между ними.

По характеру изменения измеряемой величины

Статические — связаны с такими величинами, которые не изменяются на протяжении времени измерения.

Динамические — связаны с такими величинами, которые в процессе измерений меняются (температура окружающей среды).

По количеству наблюдений

Однократные — измерения, выполненные один раз.

Многократные — измерения одного и того же размера ФВ, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом наблюдений, т. е. состоящих из ряда однократных измерений (как правило, трёх и более).

По отношению к основным единицам измерения

Абсолютные — используют прямое измерение одной или нескольких основных величин и физических констант.

Относительные — базируются на установлении отношения измеряемой величины, применяемой в качестве единицы. Такая измеряемая величина зависит от используемой единицы измерения принимаемой за исходную единицу.

По характеристике точности

Измерения бывают равноточные, неравноточные (равнорассеянные, неравнорассеянные);

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

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

1.3. Методы измерений

Метод измерений — это совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Различают следующие методы измерения:

- *метод непосредственной оценки* — метод, в котором значение величины определяют непосредственно по отчетному устройству измерительного прибора (измерение длины с помощью линейки, массы — с помощью пружинных весов, давления — с помощью манометра и т. д.);

- *метод сравнения с мерой* — метод измерения, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (измерение зазора между деталями с помощью щупа, измерение массы на рычажных весах с помощью гирь, измерение длины с помощью концевых мер и т. д.);

- *дифференциальный метод* — метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность измеряемой и известной величины, воспроизводимой мерой (измерение длины сравнением с образцовой мерой на компараторе — средстве сравнения, предназначенном для сличения мер однородных величин);

- *нулевой метод* — метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (измерение электрического сопротивления мостом с полным его уравновешиванием);

- *метод замещения* — метод сравнения с мерой, в котором измеренную величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой (взвешивание с поочередным помещением измеряемой массы и гирь на одну и ту же чашку весов);

• *метод совпадений* — метод сравнения с мерой, в которой разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение от меток шкал или периодических сигналов (измерение длины с помощью штангенциркуля с нониусом, когда наблюдают совпадение отметок на шкалах штангенциркуля и нониуса; измерение частоты вращения с помощью стробоскопа, когда положение какой-либо отметки на вращающемся объекте совмещают с отметкой на невращающейся части этого объекта при определенной частоте вспышек стробоскопа).

1.4. Погрешности измерения

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

Под *погрешностью результата измерения*, или просто *погрешностью измерения*, понимается отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой физической величины. Погрешности неизбежны. Выражение для определения погрешности записывается в виде

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x,$$

где $x_{\text{изм}}$ — результат измерения; x — истинное значение ФВ.

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

Таким образом, формула для оценки погрешности имеет следующий вид:

$$\Delta = x_{\text{изм}} - x_{\text{д}},$$

где $x_{\text{д}}$ — действительное значение ФВ.

Погрешности можно классифицировать по различным признакам. Примерная классификация приведена на рис. 1.1. Рассмотрим её более подробно.

По виду источника

Итак, по виду источника различают *методическую* погрешность (погрешность метода измерения); *инструментальную* и *субъективную*.

Методическая погрешность обусловлена несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях. Так, она возникает из-за использования приближенных формул при расчете результата или неправильной методики измерений. Выбор ошибочной методики возможен из-за несоответствия (неадекватности) измеряемой физической величины и ее модели. Причиной методической погрешности может быть не учитываемое взаимное влияние объекта измерений и измерительных приборов или недостаточная точность такого учета. Механизм взаимного влияния может быть изучен, а погрешности рассчитаны и учтены.

Инструментальная погрешность обусловлена несовершенством применяемых средств измерений. Причинами ее возникновения являются неточности, допущенные при изготовлении и регулировке приборов, изменение параметров элементов конструкции и схемы вследствие старения. В высокочувствительных приборах могут сильно проявляться их внутренние шумы.

Субъективная погрешность связана с такими индивидуальными особенностями операторов, как внимательность, сосредоточенность, быстрота реакции, степень профессиональной подготовленности. Такие погрешности чаще встречаются при большой доле ручного труда при проведении измерений и почти отсутствуют при использовании автоматизированных средств измерений.

По числовой форме представления

Различают *абсолютную* погрешность; *относительную* погрешность (относительная измеренная, относительная приведенная).

Абсолютная погрешность — погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины. Например, погрешность измерения массы в 5 кг составляет величину $\Delta = 0,001$ кг. Тогда $m = 5 \pm 0,001$ кг.

Относительная погрешность — это безразмерная величина, определяющаяся отношением абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой ФВ, она может выражаться в процентах (%). Относительная погрешность обозначается δ и определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta}{x_d} = \frac{x_{\text{изм}} - x_d}{x_d} \approx \frac{\Delta}{x_d}.$$



Рис. 1.1. Структура погрешности

Поскольку $x_d \approx x_{\text{изм}}$ (или очень мало отличается от него), то на практике обычно принимается $\delta = \Delta/x_{\text{изм}}$.

Например, относительная погрешность измерения массы в 5 кг — $5 \pm 0,001$ кг или $\delta = 0,001/5 = 0,0002$, или $\delta = 0,02\%$.

Приведенной относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к максимальному значению ФВ, которое может быть измерено данным СИ (верхний предел шкалы прибора).

По закономерности появления

Разделяют *систематические* (могут быть исключены из результатов), *случайные*, а также *грубые* или *промахи* (как правило, не включаются в результаты измерений).

В общем случае в результатах измерения всегда присутствуют и *систематическая*, и *случайная* погрешности. На практике часто бывает так, что одна из них значительно превышает другую. В этих случаях меньшей составляющей пренебрегают.

Систематическая погрешность — составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность — составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины, проведенных с одинаковой тщательностью.

Незначительность случайных погрешностей свидетельствует о хорошей *сходимости* измерений, то есть о близости друг к другу результатов измерений, выполненных повторно одними и теми же средствами, одним и тем же методом, в одинаковых условиях и с одинаковой тщательностью.

Обнаруживаются случайные погрешности путем *повторных измерений* одной и той же величины в одних и тех же условиях. Они не могут быть исключены опытным путем, но могут быть оценены при обработке результатов наблюдений. Деление погрешностей измерений на случайные и систематические очень важно, так как учет и оценка этих составляющих погрешности требуют разных подходов.

Поскольку случайные погрешности результатов измерения являются случайными величинами, в основе их обработки лежат методы теории вероятностей и математической статистики.

Грубая погрешность (промах) — погрешность результата отдельного измерения, входящего в ряд измерений, которая для данных условий резко отличается от остальных значений погрешности. Грубые погрешности необходимо всегда исключать из рассмотрения, если известно, что они являются результатом очевидных промахов при проведении измерений. Если же причины появления резко выделяющихся наблюдений установить

нельзя, то для решения вопроса об их исключении используют статистические методы. Существует несколько критериев, которые позволяют выявить грубые погрешности.

Случайная погрешность характеризует такое качество, как *точность* измерений, а систематическая — *правильность* измерения.

По характеру изменения

Систематические погрешности подразделяются на *постоянные (статические)*, *прогрессирующие*, *периодические*, *изменяющиеся по сложному закону* и *динамические*.

Статическая и динамическая погрешности

Статическая погрешность измерений — погрешность результата измерений, свойственная условиям статического измерения, то есть при измерении постоянных величин после завершения переходных процессов в элементах приборов и преобразователей.

Динамическая погрешность измерений — погрешность результата измерений, свойственная условиям динамического измерения. Динамическая погрешность появляется при измерении переменных величин и обусловлена инерционными свойствами средств измерений.

Статические и динамические погрешности относятся к погрешностям результата измерений.

Аддитивные и мультипликативные погрешности

Аддитивной называется погрешность, постоянная в каждой точке шкалы.

Мультипликативной называется погрешность, линейно возрастающая или убывающая с ростом измеряемой величины.

Различать аддитивные и мультипликативные погрешности легче всего по полосе погрешностей (рис. 1.2).

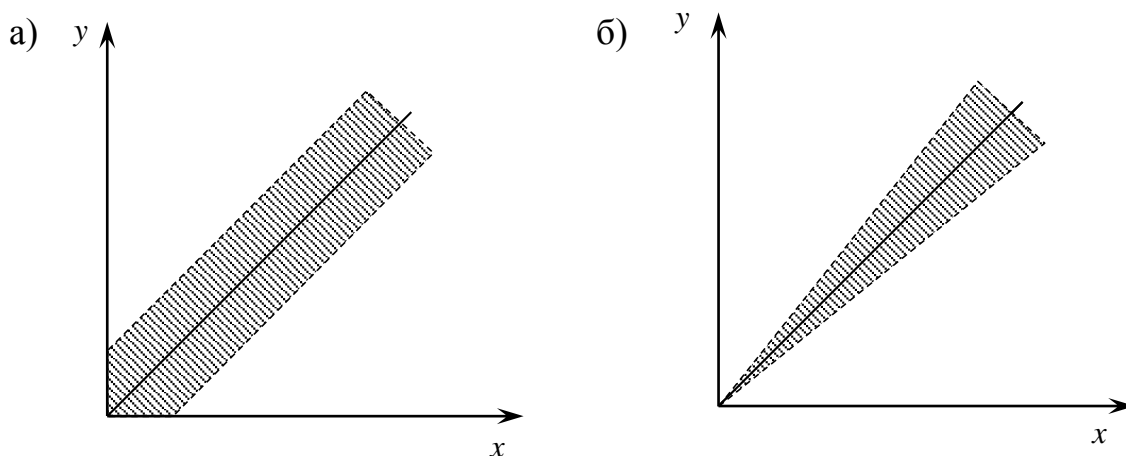


Рис. 1.2. Аддитивная (а) и мультипликативная (б) погрешности

Если абсолютная погрешность не зависит от значения измеряемой величины, то полоса определяется аддитивной погрешностью (рис.1.2, а). Иногда аддитивную погрешность называют *погрешностью нуля*. Если постоянной величиной является относительная погрешность, то полоса погрешностей меняется в пределах диапазона измерений и погрешность называется мультипликативной (рис.1.2, б).

Ярким примером аддитивной погрешности является погрешность квантования (оцифровки) аналогового сигнала.

1.5. Обработка результатов измерения

1.5.1. Причины возникновения и способы исключения систематических погрешностей

Систематические погрешности, как было показано ранее, подразделяют на *методические, инструментальные и субъективные*.

Обнаружение источников и причин возникновения систематических погрешностей позволяет принять меры к их устранению и исключению посредством введения поправок.

Поправкой называется значение величины, одноименной с измеряемой, которое нужно прибавить к полученному при измерении результату для исключения систематической погрешности.

В некоторых случаях используют *поправочный множитель* — число, на которое необходимо умножить результат измерения для исключения систематической погрешности.

Поправка или поправочный множитель определяются при помощи поверки технического средства.

Использование *метода замещения* при измерениях позволяет устранить систематическую погрешность.

Метод компенсации погрешности по знаку используется для устранения систематических погрешностей, которые могут входить в результат измерения с тем или иным знаком. В этом случае измерения проводятся дважды таким образом, чтобы погрешность входила в результаты один раз со знаком «плюс», а второй раз — со знаком «минус». Среднее значение из двух полученных результатов является окончательным с устраненной систематической погрешностью.

Использование цифровых приборов и автоматических методов измерений позволяет исключить систематическую погрешность.

Применение в измерительной технике микропроцессорных систем позволяет исключить или выполнить коррекцию систематических погрешностей, особенно инструментальных погрешностей.

Автоматическое введение поправок, связанных с неточностями градуировки, исключение погрешностей смещения нуля, исключение дополнительных и динамических погрешностей позволили существенно повысить точность измерений.

1.5.2. Оценка случайных погрешностей

Как говорилось ранее, определить истинное значение физической величины по результатам ее измерения невозможно в принципе. На основании результатов измерения могут быть получены оценка этого истинного значения (его среднее значение) и диапазон, внутри которого искомое значение находится с принятой доверительной вероятностью. Другими словами, если принятая доверительная вероятность равна 0,95, то истинное значение измеряемой физической величины с вероятностью 95% находится внутри определенного интервала результатов всех измерений. Так, в результате многократных измерений длины стержня было получено, что ее оценка равна 25,00 см, а доверительный интервал имеет границы $\pm 0,02$ см при доверительной вероятности $p = 0,95$. Это свидетельствует о том, что с вероятностью 0,95 истинное значение длины этого стержня находится внутри диапазона $(25,00 \pm 0,02)$ см.

Таким образом, конечной задачей обработки результатов любых измерений является получение оценки истинного значения измеряемой физической величины \bar{x} и диапазона значений, внутри которого находится эта оценка с принятой доверительной вероятностью.

Для равноточных (равнорассеянных) результатов измерений эта оценка представляет собой среднее арифметическое всех результатов многократных измерений \bar{x} независимо от закона распределения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

где x_i — результаты измерений; n — число измерений.

Чтобы определить диапазон (доверительный интервал) изменения среднего значения измеряемой физической величины необходимо знать закон ее распределения и закон распределения погрешности результатов измерений.

В метрологической практике обычно используются следующие законы распределения результатов измерений и их погрешностей: нормальный, равномерный, по треугольнику и трапециевидный (рис. 1.3). В большинстве случаев используется нормальный закон распределения, так как результаты измерений являются, как правило, равноточными или близкими к ним.

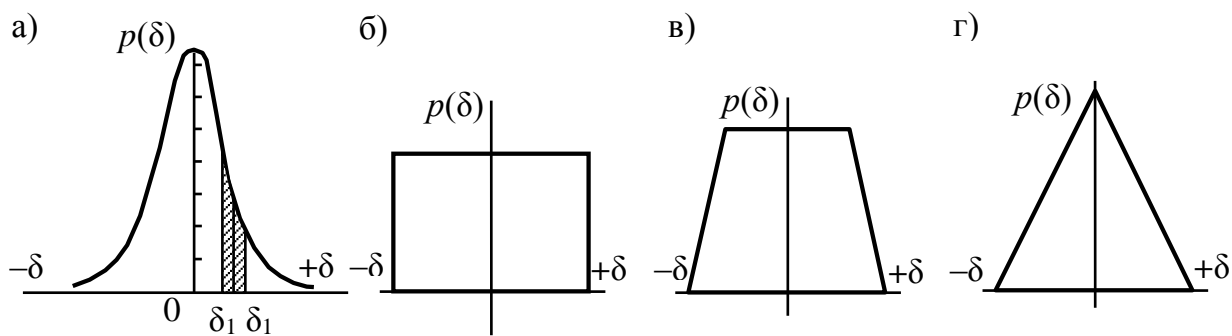


Рис. 1.3. Законы, используемые в измерительной практике для оценки погрешности: *a* – нормальный закон; *б* – равномерный; *в* – трапецевидный; *г* – треугольный

В теории погрешностей доказывается, что при увеличении числа измерений n среднее арифметическое стремится к истинному значению измеряемой величины. Следовательно, случайная погрешность среднего арифметического $\Delta\bar{x}_0$ стремится к нулю. Доказывается также, что абсолютная погрешность измерений с некоторой вероятностью не превышает $\Delta\bar{x}_0$. Окончательный результат записывают в виде $x = \bar{x} \pm \Delta\bar{x}_0$ с вероятностью p .

Относительная погрешность результата равна $\delta = \frac{\Delta\bar{x}_0}{\bar{x}}$.

Величина $\bar{x} \pm \Delta\bar{x}_0$ определяет интервал, внутри которого с доверительной вероятностью p находится истинное значение измеряемой величины. Этот интервал называют *доверительным*.

Доверительная вероятность p показывает, с какой вероятностью истинное значение измеряемой величины X находится внутри доверительного интервала (рис. 1.4).

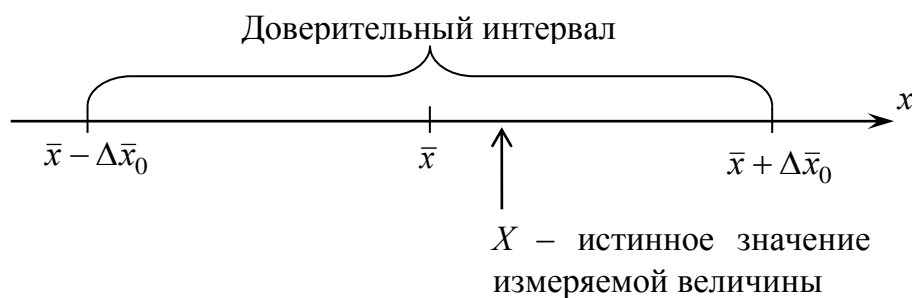


Рис. 1.4. Графическая интерпретация доверительного интервала

Английский математик Уильям Госсет, опубликовавший работы под псевдонимом Стьюдент, предложил методику обработки результатов многократных измерений одной и той же величины. Ее применяют при числе измерений $n \leq 30$. *Случайное отклонение* определяют как разность между измеренным значением x_i средним арифметическим \bar{x} :

$$\varepsilon_i = x_i - \bar{x}.$$

Случайную погрешность среднего арифметического вычисляют по формуле

$$\Delta x_0 = \frac{t \bar{\sigma}}{\sqrt{n}},$$

где t — коэффициент Стьюдента, зависящий от числа измерений n и доверительной вероятности p .

Оценка среднего квадратичного отклонения

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}.$$

Для доверительного интервала от $-3\bar{\sigma}$ до $+3\bar{\sigma}$ доверительная вероятность равна 0,9973. Вероятность появления погрешности большей, чем $3\bar{\sigma}$, равна

$$1 - 0,9973 = 0,0027 \approx 1/370.$$

Такая доверительная вероятность означает, что из 370 случайных погрешностей только одна погрешность по абсолютному значению будет больше $3\bar{\sigma}$. Поэтому значение $3\bar{\sigma}$ считается максимально возможной случайной погрешностью. Погрешности, большие $3\bar{\sigma}$ (критерий Райта), считаются промахами и при обработке результатов измерений не учитываются.

На первом этапе обработки результатов измерений оценивают наличие грубых погрешностей (промахов). Для этого определяют среднее квадратичное отклонение результатов измерений

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2},$$

затем отбрасываются промахи по условию $\varepsilon_i = x_i - \bar{x} \geq 3\bar{\sigma}$. Вычисляется новое значение $\bar{\sigma}$ при откорректированном числе измерений (с учетом отброшенных значений измерений). Далее при новом числе измерений n_1 и заданной вероятности p (обычно принимается $p = 0,95$) выбирается коэффициент Стьюдента $t_p = t(n, p)$. Эти коэффициенты приведены в зависимости

от числа опытов и вероятности в табл. 1.3. Определяются доверительный интервал и отклонение, соответствующее доверительной вероятности. Пример расчета ударной вязкости приведен в табл. 1.4.

Таблица 1.3. Таблица значений критерия Стьюдента (*t*-критерия)

<i>n</i>	<i>p</i>							
	0,80	0,90	0,95	0,98	0,99	0,995	0,998	0,999
2	3,08	6,31	12,7	31,8	63,7	128	318	637
3	1,89	2,92	4,30	6,96	9,92	14,1	22,3	31,6
4	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84	7,46	10,2	12,9
5	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60	5,60	7,17	8,61
6	1,48	2,02	2,57	3,65	4,03	4,77	5,89	6,86
7	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71	4,32	5,21	5,96
8	1,41	1,89	2,36	3,00	3,50	4,23	4,79	5,41
9	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36	3,83	4,50	5,04
10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25	3,69	4,30	4,78
11	1,37	1,81	2,23	2,76	3,17	3,58	4,14	4,59
12	1,36	1,80	2,20	2,72	3,11	3,50	4,02	4,44
13	1,36	1,78	2,18	2,68	3,08	3,43	3,93	4,18
14	1,35	1,77	2,16	2,65	3,11	3,37	3,85	4,22
15	1,35	1,76	2,14	2,62	2,98	3,33	3,79	4,14
16	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95	3,29	3,73	4,07
17	1,34	1,75	2,12	2,58	2,92	3,25	3,69	4,02
18	1,33	1,74	2,11	2,57	2,90	3,22	3,65	3,97
19	1,33	1,73	2,10	2,55	2,88	3,20	3,61	3,92
20	1,33	1,73	2,09	2,54	2,86	3,17	3,58	3,88
21	1,33	1,72	2,09	2,53	2,85	3,15	3,55	3,85
22	1,32	1,72	2,08	2,52	2,83	3,14	3,53	3,82
23	1,32	1,71	2,07	2,51	2,82	3,12	3,51	3,79
24	1,32	1,71	2,07	2,50	2,81	3,10	3,49	3,77
25	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80	3,09	3,47	3,75
26	1,32	1,71	2,06	2,49	2,79	3,08	3,45	3,73
27	1,32	1,71	2,06	2,48	2,78	3,07	3,44	3,71
28	1,31	1,70	2,05	2,47	2,77	3,06	3,42	3,69
29	1,31	1,70	2,05	2,47	2,76	3,05	3,41	3,67
30	1,31	1,70	2,05	2,46	2,76	3,04	3,40	3,85

Таблица 1.4. Определение ударной вязкости стали

i	Ударная вязкость стали a_i , Дж/м ²	$a_i - \bar{a}$	$(a_i - \bar{a})^2$	Формулы и расчет
1	530	40	1600	$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 59,81$ $3\sigma = 179$ <p>Грубых промахов нет, так как $80 < 179$</p> $t = 2,26$ по табл. 1.3 при $p = 0,95$ и $n = 10$ $a = \bar{a} \pm \Delta a$ <p>Результат измерения ударной вязкости</p> $a = 490 \pm 42,7 \text{ Дж/м}^2$ $\Delta a = \frac{t \bar{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad \Delta a = 42,7 \text{ Дж/м}^2$
2	560	70	4900	
3	540	50	2500	
4	490	0	0	
5	470	-20	400	
6	570	80	6400	
7	430	-60	3600	
8	410	-80	6400	
9	410	-80	6400	
10	490	0	0	
$\sum a_i = 4900$		$\sum (a_i - \bar{a})^2 = 32200$		
$\bar{a} = \frac{\sum a_i}{n} = 490,0$				

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

2.1. Общие сведения

В технике большинство величин, которые необходимо измерять являются неэлектрическими. Для их измерения разработана большая номенклатура преобразователей неэлектрических величин в электрические. Это объясняется тем, что электрические измерения обладают следующими преимуществами:

- возможностью непрерывного измерения любой величины; непрерывность измерений в сочетании с регистрирующими устройствами позволяет документировать изучаемое явление;
- возможностью дистанционных измерений, а также измерений в труднодоступных и опасных местах;
- возможностью достижения высокой чувствительности и точности;
- малой массой и размерами преобразователей, что позволяет исключить влияние средств измерений на изучаемое явление;
- возможностью одновременных измерений различных величин или значений одной и той же величины в разных местах;
- относительной простотой устройства для осуществления математических операций (сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д.);
- возможностью непосредственного ввода измерительной информации в память ЭВМ и, как следствие этого, возможность автоматизации измерений и их обработки, вплоть до автоматизации проводимого эксперимента или решения задач автоматического управления.

Широкое применение электрических измерений неэлектрических величин началось с конца 30-х годов XX века. В настоящее время электрические измерения являются преобладающими, однако некоторые механические, оптические и другие средства измерения еще сохранили свое значение.

2.2. Классификация преобразователей неэлектрических величин в электрические

При измерении неэлектрических величин обязательно наличие измерительного преобразователя неэлектрической величины в электрическую.

Измерительным преобразователем называется техническое средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для обработки, хранения, передачи и дальнейшего преобразования, но не поддающейся непосредственному восприятию

наблюдателем. При измерении неэлектрических величин такой преобразователь будет первичным в электрической цепи. Конструктивно обособленный преобразователь часто называют *датчиком*.

Основой построения преобразователей является использование физических явлений и эффектов, в которых неэлектрическая физическая величина однозначно связана с электрической (напряжением, током, зарядом) или с изменением электрического физического параметра (сопротивлением, индуктивностью, емкостью, диэлектрической или магнитной проницаемостью и т. д.).

Все преобразователи можно разделить на две большие группы по принципу подводимой энергии: генераторные и параметрические.

К *генераторным* преобразователям относятся преобразователи, на выходе которых непосредственно получается электрическая величина (электрический сигнал — ЭДС, ток, заряд), то есть не требуется дополнительной энергии для получения сигнала.

К *параметрическим* преобразователям относятся преобразователи, на выходе которых изменяется значение электрического физического параметра, однозначно связанного с измеряемой неэлектрической величиной. Для работы такого преобразователя требуется электрическая измерительная схема (дополнительный преобразователь), которая преобразует изменение физического параметра в электрический сигнал. Для обеспечения работы схемы требуется питание (подведение дополнительной энергии). Блок-схема измерительной цепи показана на рис. 2.1.

Примерная классификация преобразователей по используемым физическим явлениям и принципиальным конструктивным решениям (в первом приближении) представлена на рис. 2.2.

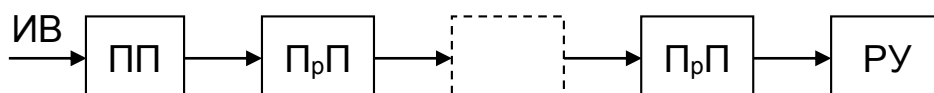


Рис. 2.1. Блок-схема измерительной цепи:

ИВ — измеряемая величина; *ПП* — первичный преобразователь; *ПрП* — промежуточный преобразователь (измерительная схема, усилитель, устройства для выполнения математических операций и т. д.); *РУ* — регулирующее (или показывающее) устройство

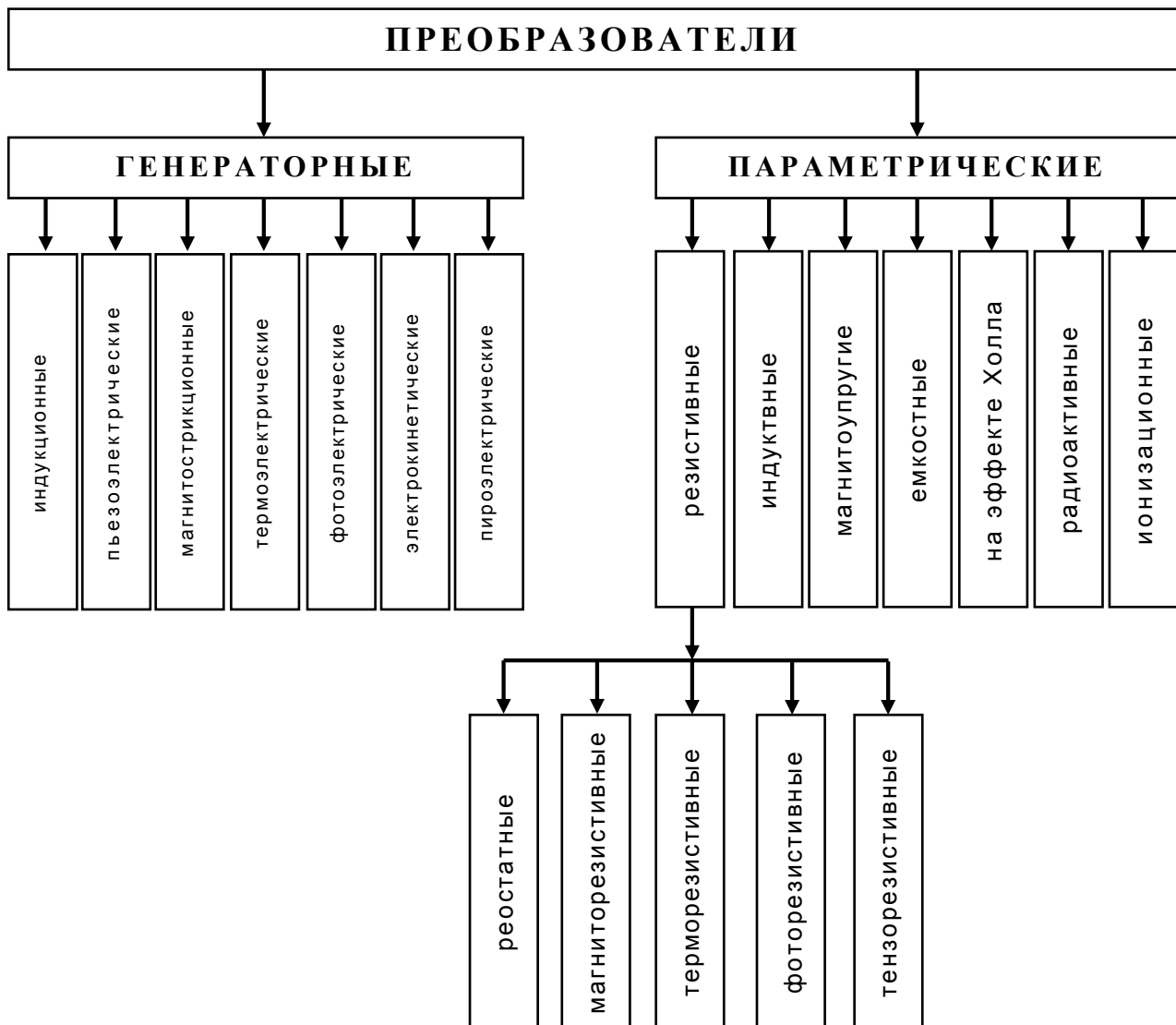


Рис. 2.2. Классификация преобразователей

2.3. Генераторные преобразователи

2.3.1. Индукционные преобразователи

В основе индукционных преобразователей лежит явление электромагнитной индукции. Индукционный преобразователь состоит из постоянного магнита (или электромагнита) и катушки. При изменении магнитного потока Φ , сцепляющегося с обмоткой катушки, в ней индуцируется ЭДС:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt},$$

где n — число витков катушки.

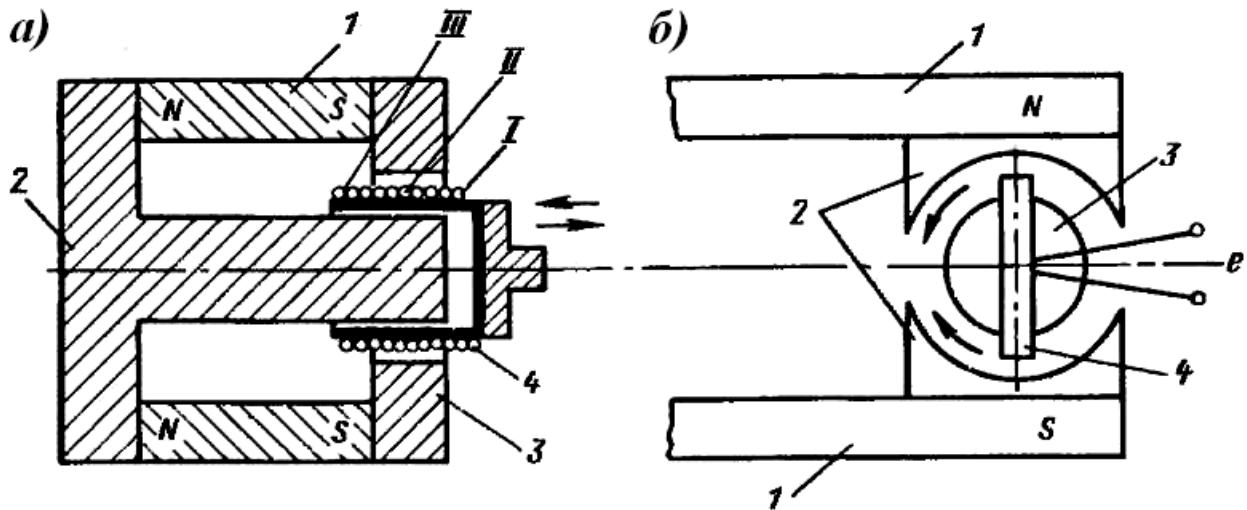


Рис. 2.3. Принципиальная схема преобразователя с подвижной катушкой: а — при линейном перемещении катушки; б — при угловом перемещении катушки

В преобразователях с подвижной поступательно перемещающейся катушкой возникает ЭДС (рис. 2.3), равная

$$e = -Bl \frac{dx_{\text{BX}}}{dt} = -B\pi Dn \frac{dx_{\text{BX}}}{dt} = S_1 \frac{dx_{\text{BX}}}{dt},$$

где B — индукция в воздушном зазоре магнита; $l = \pi Dn$ — активная длина обмотки катушки; D — средний диаметр катушки; x_{BX} — линейное перемещение катушки; $S_1 = -B\pi Dn$ — чувствительность преобразователя.

Для преобразователя с угловым перемещением, вместо величины $\frac{dx_{\text{BX}}}{dt}$ будет входить величина угловой скорости $\omega = \frac{d\varphi_{\text{BX}}}{dt}$ и соответственно

$$\text{ЭДС будет равна } e = S_2 \frac{d\varphi_{\text{BX}}}{dt}.$$

В преобразователях с неподвижной катушкой и магнитом, вследствие перемещения подвижного сердечника, изменяется магнитное сопротивление цепи, изменяется магнитный поток и соответственно ЭДС (рис. 2.4):

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} = -n \frac{d(F / R_{\text{M}})}{dt} = nF \frac{1}{R_{\text{M}}^2} \frac{dR_{\text{M}}}{dt},$$

где F — магнитодвижущая сила магнита. Полагая, что R_{M} связано с x_{BX} выражением $R_{\text{M}} = R_{\text{M}_0} (1 + k_0 x_{\text{BX}})$, где k_0 — постоянная; R_{M_0} — магнитное сопротивление магнитопровода.

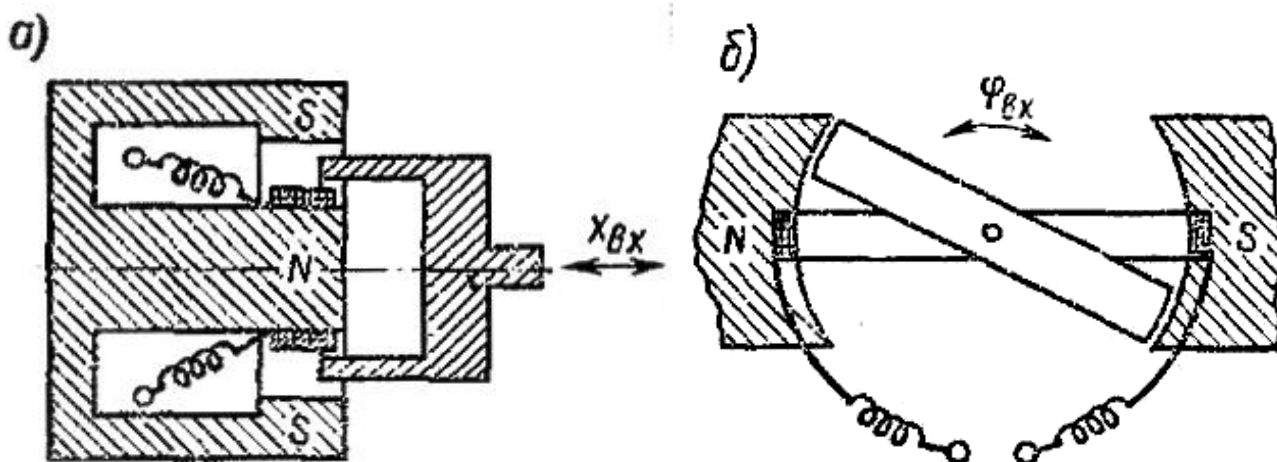


Рис. 2.4. Принципиальная схема преобразователя с неподвижной катушкой и магнитом (с подвижным ферромагнитным якорем):
a — при линейном перемещении якоря; *б* — при угловом перемещении якоря

При $x_{\text{BX}} = 0$ и считая $\Delta R_{\text{M}} \ll \Delta R_{\text{M}_0}$, получим уравнение преобразования в виде

$$e = nF \frac{k_0}{R_{\text{M}_0}} \frac{dx_{\text{BX}}}{dt} = S_e \frac{dx_{\text{BX}}}{dt},$$

где $S_e = nF \frac{k_0}{R_{\text{M}_0}}$ — чувствительность преобразователя.

Наибольшее применение получили преобразователи с подвижной катушкой, так как при надлежащей конструкции они обеспечивают хорошую линейность и высокую точность преобразования линейной скорости в напряжение. Преобразователи с вращающейся катушкой широко используются в приборах для измерения скорости вращения — тахометрах, а также для измерения вращающих моментов.

Преобразователи с изменяющимся магнитным сопротивлением обладают значительной нелинейностью и гистерезисом.

Так как значение выходной величины индукционных преобразователей, как правило, достаточно велико (от долей вольта до десятков вольт), то возможно применение простых измерительных устройств.

Индукционные преобразователи обладают высокой чувствительностью, что позволяет измерять малые перемещения, скорости, ускорения и другие величины, изменяющиеся с частотой до $15 \div 30$ кГц. Погрешность преобразователей с постоянным магнитом и подвижной катушкой составляет $0,2 \div 0,5\%$.

2.3.2. Пьезоэлектрические преобразователи

В основе принципа действия преобразователей лежит пьезоэффект, который заключается в возникновении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков под действием механических сил или деформаций. Вещества, у которых наблюдаются такие свойства, называются *пьезоэлектриками*.

Прямым пьезоэлектрическим эффектом называется появление электрических зарядов на гранях пьезоэлектриков при их сжатии или растяжении. При прекращении действия силы заряды на его гранях исчезают.

Обратным пьезоэлектрическим эффектом называется изменение геометрических размеров пьезоэлектрика при воздействии на его грани внешнего электрического поля.

В кристалле кварца (типичном представителе пьезоэлектриков) различают следующие главные кристаллографические оси (рис. 2.5, а): продольную или оптическую ось Z ; электрическую ось X ; механическую ось Y .

Параллелепипед, вырезанный из кристалла кварца таким образом, чтобы его грани были параллельны указанным главным осям (так называемый X -срез, показанный на рис. 2.5, б), обладает следующими свойствами:

- *продольным пьезоэффектом* при действии силы F_x в направлении электрической оси X ; на гранях, параллельных механической оси Y (гранях a и c), появится электрический заряд q (рис. 2.5, б);
- *поперечным пьезоэффектом* при действии силы F_y в направлении механической оси Y ; заряды появятся на тех же гранях a и c ;
- отсутствием зарядов при действии силы F_z вдоль оптической оси.

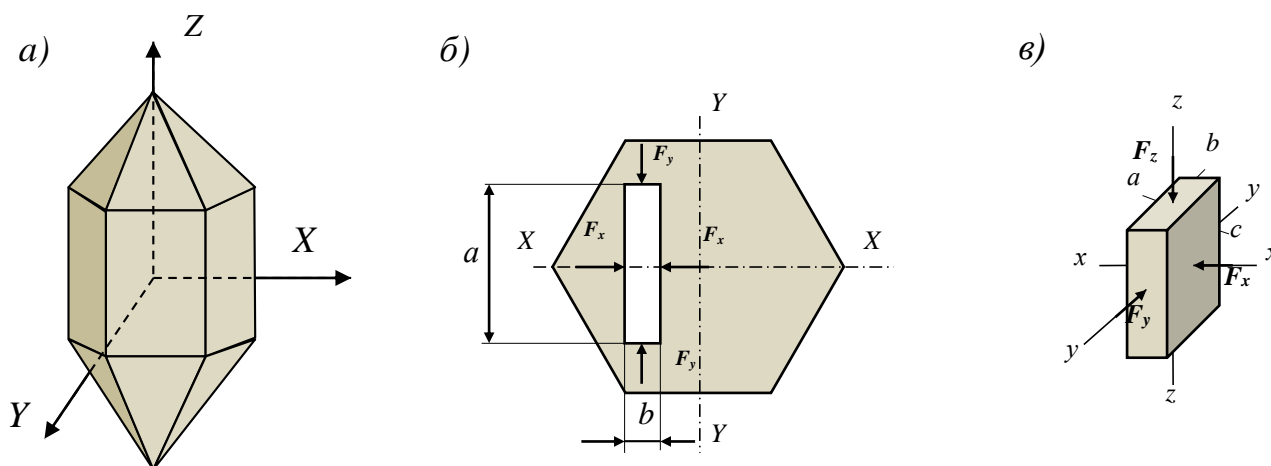


Рис. 2.5. Главные оси кристалла кварца и параметры, вырезаемой пластины:
а — кристалл и его оси; б — X-срез кристалла; в — размеры пластины

Величина заряда на гранях ac при действии силы F_x не зависит от размеров пластины, а определяется лишь значением силы

$$q = d_1 F_x,$$

где d_1 — пьезоэлектрическая постоянная (или пьезомодуль), зависящая от свойств материала. Знак заряда изменяется с изменением знака силы F_x .

Величина заряда на гранях ac при действии силы F_y зависит от размеров пластины и определяется формулой

$$q = d_1(a/b)F_y,$$

где a , b — размеры пьезопластинки в направлениях осей X и Y соответственно.

В качестве пьезоэлектриков используют кварц, титанат бария, сегнетову соль, дигидрофосфат аммония и другие диэлектрики. Наибольшее распространение получили кварц и титанат бария.

Кварц — природный или синтетический материал, очень стоек к воздействиям температуры и влажности, механически прочен ($\sigma_{\max} = 70 \div 100$ МПа), имеет незначительный коэффициент линейного расширения, удельное объемное сопротивление — порядка 10^{16} Ом/м, но сильно зависит от температуры и имеет неодинаковое значение в направлении различных осей. Пьезомодуль ($d_1 = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н) практически не зависит от температуры в пределах до 200°C , а в диапазоне $(200 \div 500)^\circ \text{C}$ изменяется незначительно; при 573°C теряет пьезоэлектрические свойства. Электрические и механические свойства кварца имеют высокую стабильность. За 10 лет изменение характеристик не превосходит 0,05%.

Титанат бария (BaTiO_3) — синтетический материал (искусственно поляризованная керамика). Свойства титаната бария сильно зависят от примесей, технологии изготовления и значения поляризующего напряжения. Его пьезоэлектрический модуль лежит в пределах $d_1 = (4,35 \div 8,35) 10^{-11}$ Кл/Н. Он не остается постоянным и в ряде случаев уменьшается в течение двух лет до 20%; имеет несколько точек структурного перехода; при -80° , $+10^\circ$ и $+120^\circ \text{C}$ параметры претерпевают резкие изменения.

В зависимости от легирующих присадок (титанат кальция, титанат свинца и др.) титанат бария может хорошо сохранять постоянство пьезомодуля до $+200^\circ \text{C}$. Основной недостаток этого материала — нелинейность зависимости заряда от приложенной силы и наличие в этой зависимости гистерезиса. Имеет место также явление изменения диэлектрической постоянной от давления. Однако высокая механическая прочность, большое значение пьезомодуля (примерно в 50 раз больше, чем у кварца) и дешевизна обеспечивают ему широкое применение. Ценным свойством керамики титанатов бария является возможность изготовления пьезоэлементов практически любой формы, в том числе шаровой или цилиндрической с соответствующей радиальной поляризацией.

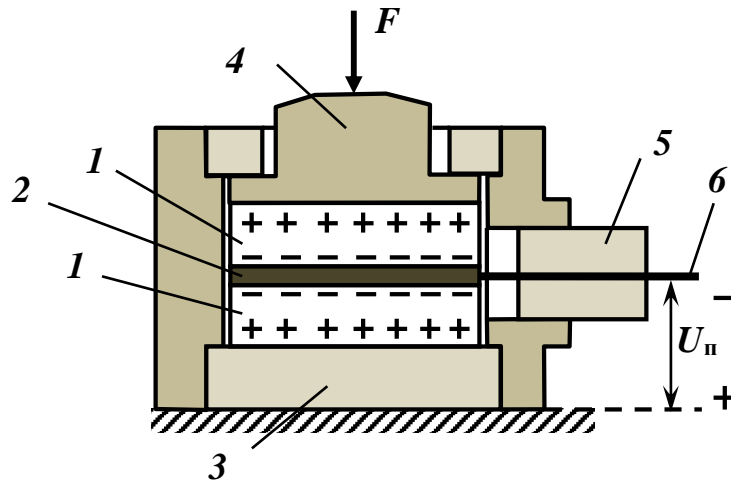


Рис. 2.6. Схема устройства пьезоэлектрического преобразователя:
 1 — пьезопластина; 2 — металлическая прокладка; 3 — основание;
 4 — нажимное устройство; 5 — изолятор; 6 — вывод

В последнее время широко применяется керамика цирконат-титанат свинца, обладающая наибольшим пьезомодулем, стабильность которого сохраняется до значительно более высоких температур, чем у BaTiO_3 . Так, керамика ЦТС-8 имеет пьезомодуль, в четыре раза больший, чем BaTiO_3 .

Схема устройства пьезопреобразователя приведена на рис. 2.6. Под действием измеряемой силы F , действующей на нажимное устройство 4, пьезопластины 1 будут сжаты и на металлической прокладке 2 и выводе 6 появится отрицательный потенциал, а на основании 3 — положительный.

2.3.3. Термоэлектрические преобразователи

Термоэлектрический датчик обычно называется *термопарой*. Место соединения термоэлектродов называется *горячим* или *рабочим спаем*. Противоположные концы называются *холодными* или *свободными*.

Термоэлектрический преобразователь представляет собой термопару, состоящую из двух разнородных проводников a и b , соединенных между собой в двух точках, как схематически показано на рис. 2.7, a . На границе раздела двух различных металлов возникает контактная разность потенциалов $E_{ab}(t)$, зависящая от рода металлов и от температуры контакта. В цепи, показанной на рис. 2.7, a , контактные разности потенциалов образуются в точках 1 и 2. Если $t_1 \neq t_2$, то в цепи возникает ЭДС

$$E = E_{ab}(t_1) - E_{ab}(t_2),$$

называемая *термоэлектродвижущей силой (ТЭДС)*. Места контактов называются *спаями термопары*.

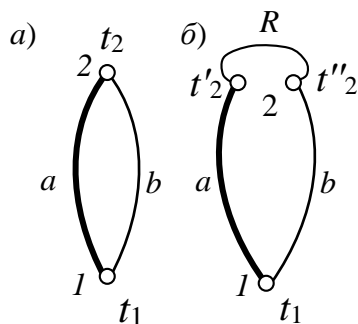


Рис. 2.7. Термоэлектрический преобразователь

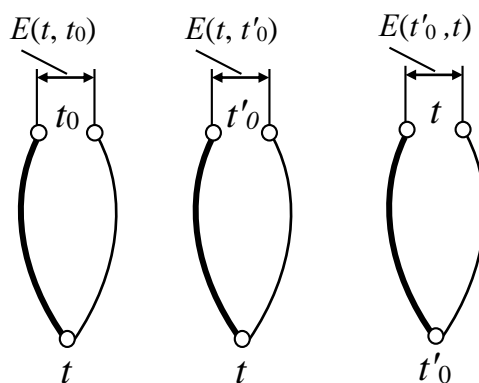


Рис. 2.8. К свойствам термопар

Приведенная формула определяет следующие свойства термопары:

- если в цепь термопары включен третий проводник (проводник R на рис. 2.7, б), и его концы находятся при одинаковых температурах $t'_1=t''_2$, то его включение не изменяет ЭДС цепи. Третьим проводником являются провода прибора, измеряющего ЭДС термопары, и провода, соединяющие его с термопарой; если концы термопары, подключенные к соединительным проводам, находятся при одинаковых температурах, то подключение измерительного прибора не изменяет ТЭДС;
- ЭДС термопары является функцией двух независимых температур ее спаев $E=E(t_1, t_2)$ и не зависит от температур других точек термопары;
- если термопара имеет температуры спаев t и t_0 , то ТЭДС равна алгебраической сумме двух ЭДС, одна из которых генерируется при температуре спаев t и t'_0 , другая — при температурах t'_0 и t_0 (рис. 2.8):

$$E=E(t, t_0)=E(t, t'_0)+E(t'_0, t_0).$$

Это свойство используется при измерении температуры спая t , если температура второго спая t'_0 , отличается от температуры t_0 , при которой была произведена градуировка термопары.

Таблица 2.1. Термопары и их основные характеристики

Тип термопары	Материал термоэлектродов	Обозначение градуировки	Диапазон измерения при длительном измерении, °С
ТХК	Хромель-копель	ХК(L)	-200...+600
ТХА	Хромель-алюмель	ХА(К)	-200...+1000
ТПП	Платинородий (10%)-платина	ПП(S)	0...+1300
ТВР	Вольфрамрений (5%) Вольфрамрений (20%)	ВР(A)-1	0...+2200

При $t_0=0$ функция $E(t, 0)$ представляет собой градуировочную функцию преобразования данной термопары. Значение $E(t, t'_0)$ определяется экспериментально, а значение $E(t'_0, 0)$ — по значению температуры t'_0 и градуировочной функции преобразования. По значениям $E(t, t'_0)$ и $E(t'_0, 0)$ вычисляется $E(t_0, 0)$, по которой определяется измеряемая температура.

Термоэлектрические преобразователи используются для измерительного преобразования температуры в ЭДС. В табл. 2.1 приведены наиболее широко используемые термопары и их основные характеристики.

2.3.4. Фотоэлектрические преобразователи

В основе лежит явление возникновения разности потенциалов (фото-ЭДС) на границе проводника и полупроводника при облучении полупроводника световым потоком. Такие преобразователи получили название вентильные фотоэлементы (с запирающим слоем). Существуют медно-закисные, сернисто-таллиевые, сернисто-серебряные и кремниевые вентильные фотоэлементы. При включении вентильного фотоэлемента в измерительную цепь будет протекать фототок, зависящий от величины светового потока.

Преобразователи используются в основном для измерения освещенности. Фотоэлектрические преобразователи, используемые для измерения несветовых величин, имеют ряд особенностей.

Имеется возможность измерения без контакта с объектом измерения, отсутствует механическое воздействие на объект измерения.

Вследствие этого применяется при измерениях, в которых преобразователь работает в режиме реле, например, при измерении частоты вращения вала, у которого имеется диск с отверстиями. При вращении диск прерывает луч света, падающий на фотоэлектрический преобразователь. В этом случае измеряемая скорость преобразуется в частоту электрических импульсов.

Фотоэлектрические преобразователи применяются для измерения различных неэлектрических величин.

При измерении концентрации вещества в растворе, тогда световая величина является промежуточной величиной преобразования при поглощении света раствором.

Использование фотоэлектрического преобразователя в пирометрах — приборах для измерения температур от 400 до 4000°C.

2.3.5. Электретные преобразователи

Построение преобразователей основано на явлении электростатической индукции. Электрет представляет собой тело из диэлектрика, затвердевание или полимеризация которого происходила в сильном электростатическом поле, в результате чего тело в твердом состоянии сохраняет поляризацию молекул. Если из такого тела вырезать пластинку перпендикулярно направлению поля, то она будет иметь заряды разного знака на своих поверхностях. Например, поверхностная плотность заряда электрета из органического стекла составляет $3 \cdot 10^{-9}$ К/см². Заряд сохраняется не менее года. Диапазон использования электретов простирается от бытовой техники (широко известны высококачественные электретные микрофоны) до техники специального назначения (например, электретные дозиметры, электретные гидрофоны и т.п.).

На основе электрета могут быть построены преобразователи для скорости механического движения (скорости, вибрации, микрофонов и т. д.).

2.4. Параметрические преобразователи

2.4.1. Резистивные преобразователи

К числу резистивных преобразователей относятся *контактные* и *реостатные*.

Измерительные преобразователи, в которых измеряемая величина преобразуется в одно из двух состояний контактов (замкнутое или разомкнутое), называют *контактными*. Эти преобразователи под воздействием измеряемой величины коммутируют всю измерительную цепь прибора или ее часть. Для предохранения контактов от внешних воздействий (влажности, пыли и т.п.) их помещают в герметизированный стеклянный корпус (герконы).

Реостатный преобразователь — это прецизионный реостат, токосъемник (движок) которого перемещается под действием измеряемой величины. Входной величиной преобразователя является угловое или линейное перемещение движка, выходной — изменение его сопротивления.

Устройство преобразователя показано на рис. 2.9. Преобразователь состоит из каркаса 1, на который намотан провод 2 и токосъемного движка 3, укрепленного на оси 4. Движок касается провода 2 обмотки, которая в зоне контакта зачищается от изоляции. В показанной конструкции контакт с подвижным движком осуществляется с помощью неподвижного токосъемного кольца 5.

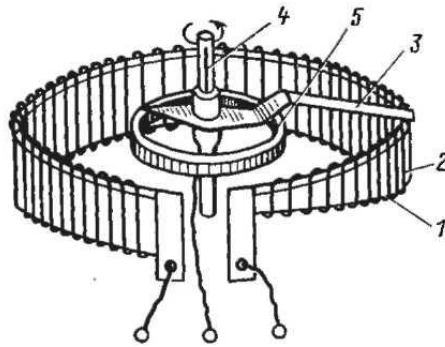
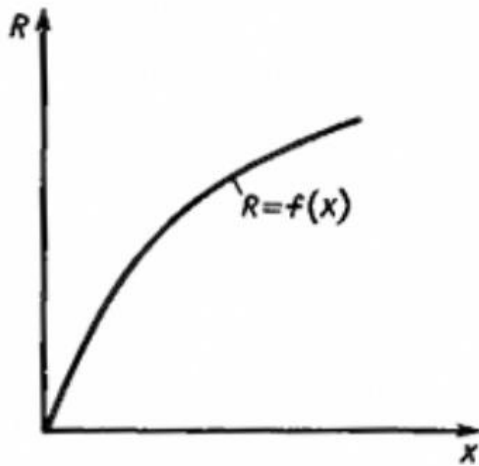


Рис.2.9. Конструкция реостатного преобразователя:

1 – каркас; 2 – провод; 3 – токосъемный движжок; 4 – ось; 5 – токосъемное кольцо

а)



б)

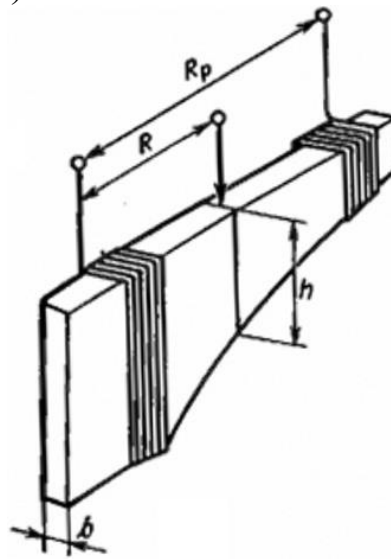
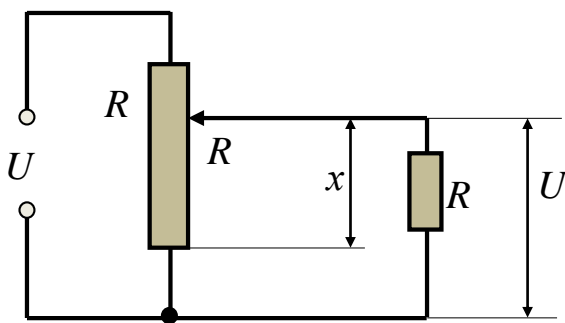


Рис.2.10. Реостатный преобразователь с нелинейной характеристикой преобразования:

а – график функции преобразования $R=f(x)$; б – конструкция

а)



б)

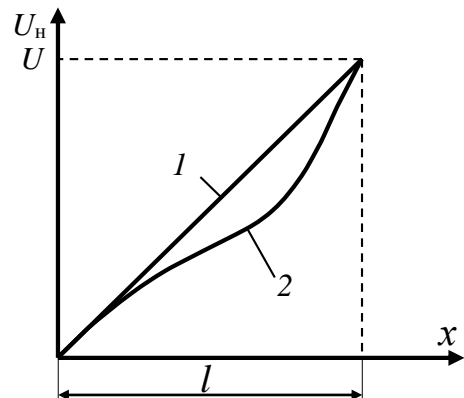


Рис. 2.11. Потенциометрическая схема включения преобразователя:

а – схема включения; б – зависимость выходного напряжения от положения движка (1 – сопротивление нагрузки много больше сопротивления потенциометра $R_H \gg R_n$; 2 – сопротивление нагрузки соизмеримо с сопротивлением потенциометра $R_H \approx R_n$)

Обмотка делается обычно из провода, изготовленного из материала с высоким удельным сопротивлением (манганина, константана, фехраля).

Уравнение преобразования такого преобразователя в самом общем виде представляет $R=f(x_{вх})$, где R — выходное сопротивление преобразователя, $x_{вх}$ — угловое или линейное перемещение движка.

Преобразователи выполняются в виде намотанной изолированной проволоки на каркас из диэлектрика различной формы: прямолинейной пластины, кольца и др. Диаметр провода — от 0,02 до 0,1 мм. Сопротивление выпускаемых преобразователей колеблется от десятков до нескольких тысяч Ом. Одно из основных требований, предъявляемых к материалу проволоки, — малый температурный коэффициент сопротивления.

Намотка — сплошная (виток к витку) или с принудительным шагом. Подвижный контакт (движок) изготавливается из сплава платины с иридием или платины с бериллием и тщательно полируется. Для обеспечения хорошего контакта движок должен прижиматься к обмотке силой 10^{-3} – 10^{-4} Н. Сила создается благодаря упругости движка.

В измерительной технике используются реостатные преобразователи с линейной и с нелинейной функцией преобразования. Одним из способов построения преобразователей с нелинейной функцией преобразования $R = f(x_{вх})$ (рис. 2.10, а) является использование каркаса с переменной высотой (рис. 2.10, б).

Потенциометрический преобразователь — это реостатный преобразователь, включенный по потенциометрической схеме.

Потенциометрическая схема преобразователя показана на рис. 2.11, а.

Напряжение с токосъемника (движка) подается на нагрузку R_n . Если сопротивление R_n много больше сопротивления потенциометра R_p , то напряжение на нагрузке пропорционально сопротивлению R_x и соответственно пропорционально перемещению движка $U_n=U(x/l)$ (прямая 1 на рис. 2.11, б). Если сопротивление нагрузки R_n соизмеримо с номинальным сопротивлением преобразователя R_p , то выходное напряжение отклоняется от линейной зависимости (кривая 2 на рис. 2.11, б). Схема преобразователя (чувствительного к знаку перемещения) с нулевой средней точкой показана на рис. 2.12.

Погрешность дискретности обусловлена тем, что сопротивление преобразователя изменяется не плавно, а ступенчато (рис. 2.13). Эта погрешность уменьшается с увеличением числа витков преобразователя на единицу измеряемого перемещения. Для преобразователей с равномерной намоткой погрешность дискретности равна $\delta = \frac{1}{2n}$, где n — число витков.

Величина погрешности нелинейности составит 0,1–0,03%.

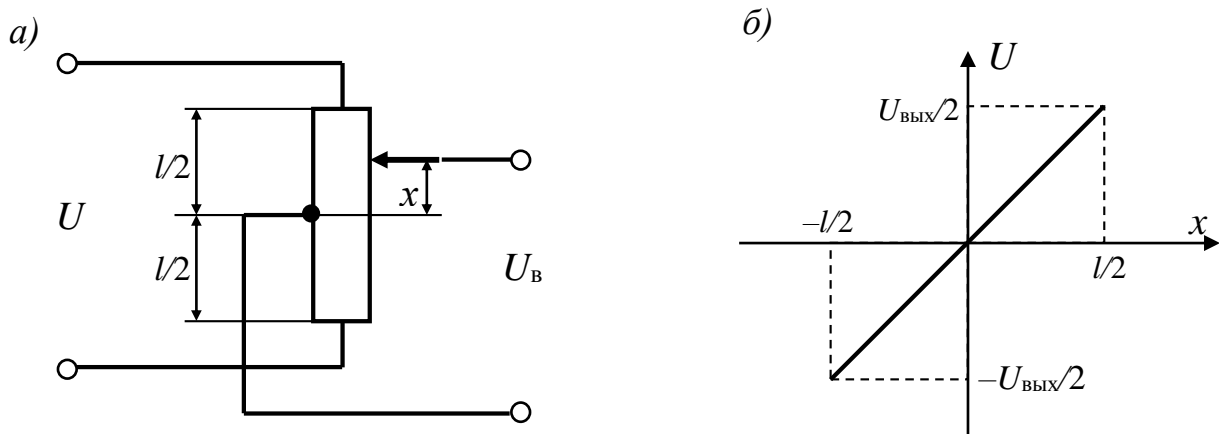
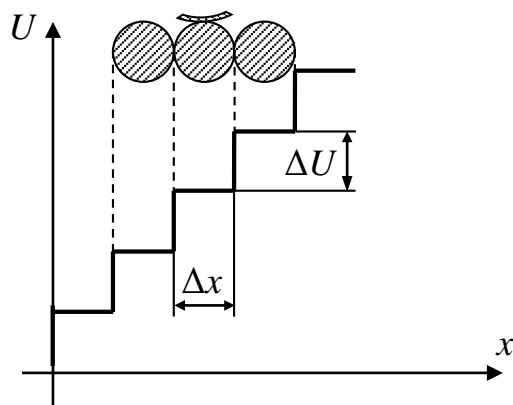


Рис. 2.12. Потенциметрический преобразователь с нулевой средней точкой:
a – схема соединения; *б* – зависимость выходного напряжения
от положения токосъемника



**Рис. 2.13. Погрешность дискретности реостатного
и потенциметрического преобразователей**

Температурная погрешность определяется прежде всего ТКС (температурным коэффициентом сопротивления) провода, который, как правило, меньше 0,1% на 10^5 °С. При включении преобразователя по потенциметрической схеме в режиме холостого хода изменение температуры не меняет распределение напряжений, и температурная погрешность отсутствует.

Достаточно большая выходная мощность позволяет в ряде случаев избежать необходимости усиления сигнала в измерительной цепи.

Наиболее широкая область применения таких преобразователей — преобразование линейных (более 2–3 мм) или угловых перемещений объекта, способного развивать усилия от 10^{-2} Н и более.

Для измерения переменных величин преобразователи могут быть использованы, если частота не превышает 5 Гц.

Магниторезистивные преобразователи

Магниторезистивный эффект, называемый также эффектом Гаусса, заключается в изменении электрического сопротивления под воздействием магнитного поля. *Магниторезисторами* называют полупроводниковые приборы, сопротивление которых меняется в магнитном поле.

Структурой магниторезистора является пластина, ширина которой много больше длины. Такая структура обладает наибольшим относительным изменением сопротивления в магнитном поле.

Магниторезисторы обладают довольно большой чувствительностью. Она лежит в пределах от 10^{-13} до 10^{-4} А/м. Наибольшей чувствительностью обладают магниторезисторы, изготовленные из InSb-NiSb.

Магниторезистивный эффект очень хорошо подходит для использования во всех видах механо-электрических преобразователей.

Терморезистивные преобразователи

Металлические термометры сопротивления. Принцип действия термометров сопротивления основан на изменении их электрического сопротивления от температуры объекта. Они конструктивно выполняются посредством намотки проволоки из меди или платины на изоляционный каркас. Для защиты от механических повреждений и удобства монтажа термометры сопротивления заключают в защитную арматуру различного исполнения. Общий вид термометра сопротивления показан на рис. 2.14.

В общем виде зависимость имеет вид $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где R_t — сопротивление датчика при его нагревании на t градусов Цельсия; R_0 — сопротивление датчика при 0°C ; α — температурный коэффициент.

Изменение температуры вызывает изменение теплового колебания кристаллической решетки металла, что, в свою очередь, влияет на изменение электрического сопротивления датчика. То есть чем выше температура датчика, тем выше колебания кристаллической решетки, а значит, больше и электрическое сопротивление. В качестве материала для изготовления термометров сопротивления используют только чистые металлы: платину в виде тонкой проволоки диаметром 0,05–0,07 мм для измерения температур до 630°C и медь, никель или железо в виде проволоки диаметром 0,1 мм для измерения температур 100 – 150°C . Наиболее широко применяют платину и медь.

Термистор — это полупроводниковый прибор, в котором используется зависимость электрического сопротивления полупроводников от температуры. Для термисторов характерны большой температурный коэффициент сопротивления, простота устройства, способность работать

в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени. Они могут иметь весьма малые размеры, что существенно для измерений температуры малых объектов. Обычно термисторы имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, в отличие от металлов.

Самыми распространенными типами датчиков для измерения температуры в промышленных условиях являются *термометры сопротивления*. Такие термометры используют в приборах контроля и автоматического регулирования температуры. Обычно чувствительный элемент (терморезистор) включается в мостовую измерительную схему (рис. 2.15).

Преимущества термометров сопротивления:

- высокая точность измерений (обычно лучше $\pm 1^\circ\text{C}$), может достигать $0,0013^\circ\text{C}$;
- практически линейная характеристика.

Недостатки термометров сопротивления:

- относительно малый диапазон измерений (по сравнению с термопарами)
- дороговизна (в сравнении с термопарами из благородных металлов, для платиновых термометров сопротивления типа ТСП).
- требуется дополнительный источник питания для задания тока через датчик.



Рис. 2.14. Общий вид терморезисторов

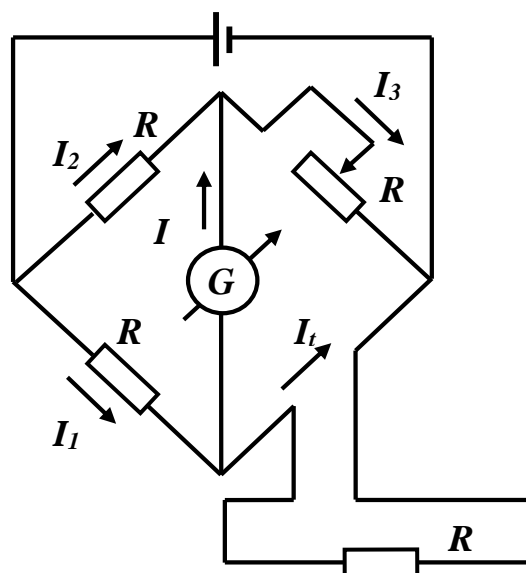


Рис. 2.15. Схема включения терморезистора

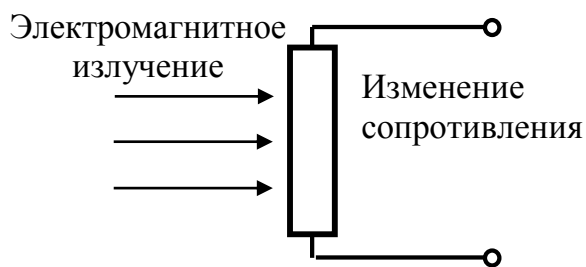


Рис. 2.16. Фотопроводящее преобразование

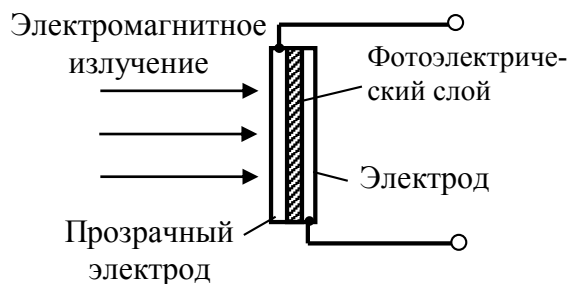


Рис. 2.17. Солнечный элемент как пример фотоэлектрического преобразователя

Фоторезистивные преобразователи

Эти преобразователи превращают изменение измеряемой величины в изменение сопротивления используемого материала (рис. 2.16). Несмотря на то, что используемые материалы являются полупроводниковыми, фотопроводящие преобразователи не всегда являются полупроводниковыми приборами, поскольку они не имеют переходов между различными типами полупроводников. Такие преобразователи называются *пассивными*, то есть нуждаются во внешнем питании. Зачастую их название характеризует тип используемого преобразования, например, светочувствительные резисторы.

Сопротивление материала является функцией плотности основных носителей заряда, и так как плотность увеличивается с возрастанием интенсивности излучения, то проводимость возрастает. Поскольку проводимость обратно пропорциональна сопротивлению, можно заключить, что сопротивление является обратной функцией интенсивности облучения. Значение сопротивления при полном облучении составляет в общем случае 100–200 Ом, а в полной темноте это сопротивление достигает порядка МОм (мегаом). В конструкции зависящих от света резисторов чаще всего используются такие материалы, как сульфид кадмия или селенид кадмия.

Тензорезистивные преобразователи

Явление зависимости электрического сопротивления металлического проводника от его механической деформации было открыто английским ученым Томпсоном в 1855 г. *Тензорезисторный преобразователь* (датчик сопротивления, *тензорезистор*) представляет собой проводник, изменяющий свое сопротивление при деформации сжатия-растяжения. При деформации проводника изменяются его длина l и площадь поперечного сечения f . Деформация кристаллической решетки приводит к изменению удельного сопротивления ρ .

Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника, определяемого формулой

$$R = \frac{\rho l}{f}$$

Для относительных деформаций, не превышающих $5 \cdot 10^{-3}$, с достаточной точностью можно считать, что относительное изменение электрического сопротивления проводника пропорционально его относительной механической деформации, то есть

$$\frac{\Delta R}{R} = S \frac{\Delta l}{l} = S \varepsilon,$$

где R — электрическое сопротивление недеформированного проводника; ΔR — приращение электрического сопротивления проводника при его деформировании; l — исходная длина проводника; Δl — приращение длины проводника при его деформировании; S — коэффициент тензочувствительности материала датчика.

Наибольшее распространение для измерения механических деформаций в настоящее время получили проволочные и фольговые тензорезисторы.

Проволочный тензорезистор (рис. 2.17, а) представляет собой металлическую проволоку диаметром 12–30 мкм, уложенную в виде петель (петлевая решетка) на подложку из специальной тонкой бумаги и приклеенную к ней. Концы проволоки припаяны или приварены к ленточным или проволочным выводам из луженой меди.

Фольговый тензорезистор (рис. 2.17, б) представляет собой решетку, вытравленную из металлической фольги, толщиной 2–10 мкм, наклеенную на подложку из специальной пленки. Выводы от концов решетки выполнены аналогично проволочному тензорезистору. Длина решетки l носит название *базы тензорезистора*.

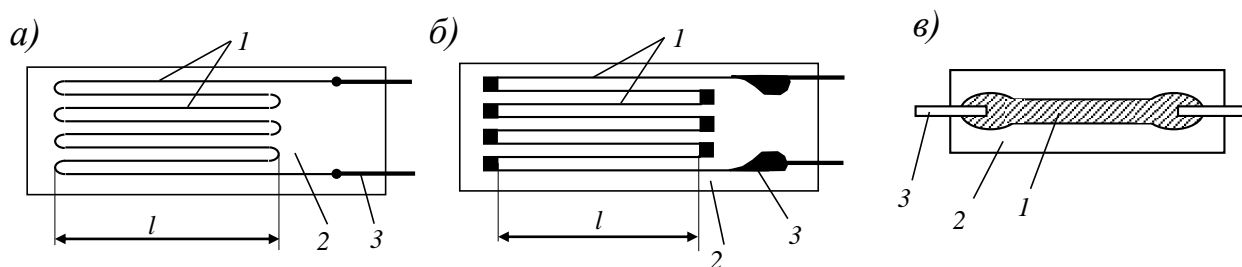


Рис. 2.17. Конструкция тензорезисторов:

- а* — проволочный тензорезистор; *б* — фольговый тензорезистор;
- в* — полупроводниковый тензочувствительный преобразователь;
- l* — проволочная или фольговая решетка, монокристаллический полупроводник или пленка; 2 — бумажная или пленочная подложка; 3 — выводы

Полупроводниковые тензочувствительные преобразователи представляют собой тонкий брусок, толщиной 20–50 мкм, шириной до 0,5 мм и длиной 2–12 мм, вырезанный из монокристалла полупроводника (рис. 2.17, в) или тонкую пленку, наклеенную на бумажную или лаковую подложку.

Значение коэффициента тензочувствительности зависит от материала, из которого изготовлена проволока или фольга. Наиболее широко используется сплав высокого электрического сопротивления — константан (60% Cu; 40% Ni), для которого значение S лежит в пределах 1,9–2,1. Наивысшее значение коэффициента тензочувствительности из металлических проводников у платины, для которой $S \approx 6,0$.

Значение коэффициента тензочувствительности полупроводникового тензорезистора зависит от материала, количества примесей и типа проводимости и изменяется от –100 до +200 и выше.

Тензопреобразователи (тензорезисторы) закрепляются с помощью клея на поверхности изделия. Наличие петли у проволочного тензорезистора, воспринимающей деформацию перпендикулярного направления по отношению к основной деформации, а также двух клеевых прослоек и подложки приводит к снижению коэффициента тензочувствительности преобразователя по сравнению с проволокой или фольгой. Его величина существенно зависит от механических свойств клея и качества наклейки. Снижение коэффициента тензочувствительности преобразователя не превышает 2–3 %.

Различные производственные факторы приводят к разбросу начальных сопротивлений и коэффициента тензочувствительности тензорезисторов. Поэтому после изготовления тензорезисторы сортируются в партии по значению начального электрического сопротивления. Разброс по сопротивлению в партии допустим в пределах 1%.

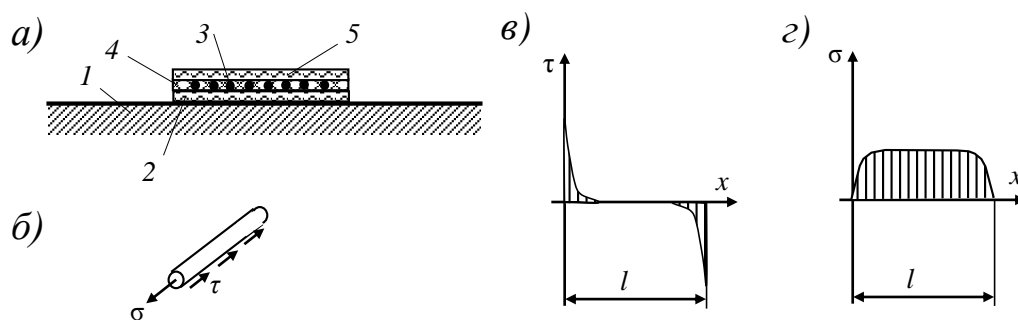


Рис. 2.18. Передача усилий на решетку тензорезистора:

- a* – поперечное сечение ТР (1 – изделие; 2 – подложка; 3 – решетка; 4 – клей; 5 – защитный слой); *б* – усилия, действующие на элемент решетки; *в* – распределение касательных напряжений по длине решетки; *г* – распределение нормальных напряжений по длине решетки

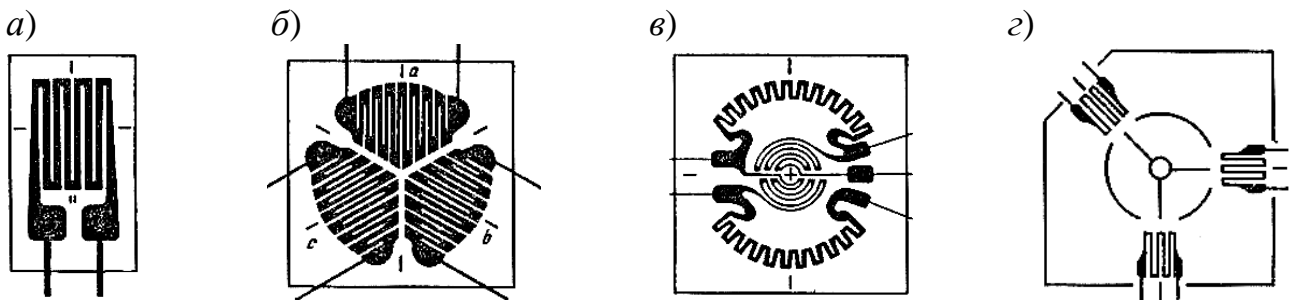


Рис. 2.19. Формы чувствительных элементов тензорезисторов:
a – одиночный ТР; *б* – равноугольная розетка; *в* – мембранный мост ТР;
г – равноугольная розетка для определения остаточных напряжений

От партии датчиков (тензорезисторов), которую предполагается использовать для замеров, отбирается около 5% от их числа для определения их коэффициента тензочувствительности. Отобранные датчики наклеиваются на тарировочную балку, изготавливаемую из того же материала, из которого изготовлено изделие.

Вместо определения коэффициента тензочувствительности на практике чаще выполняют градуирование измерительного прибора или всей измерительной цепи в единицах относительной деформации или непосредственно в напряжениях для одноосного напряженного состояния. Для различных задач исследования НДС выпускаются тензорезисторы различной формы (рис. 2.19).

Пленочные тензорезисторы изготавливаются путем возгонки в вакууме тензочувствительного материала и осаждения его затем на подложку определенной конфигурации.

2.4.2 Индуктивные преобразователи

Принцип действия индуктивного преобразователя основан на изменении полного сопротивления катушки индуктивности (дросселя) при взаимном относительном перемещении элементов магнитопровода. Имеются две группы преобразователей: с изменяющейся индуктивностью и с изменяющимся активным сопротивлением. Пример схемы преобразователя с изменяющейся индуктивностью показан на рис. 2.20, *a*, *б*. Преобразователь, показанный на рис. 2.20, *a* состоит из П-образного магнитопровода 1, на котором размещена катушка 2, и подвижного якоря 3. При перемещении якоря изменяется длина воздушного зазора и, следовательно, магнитное сопротивление, что вызывает изменение индуктивности дросселя.

На рис. 2.20, *б* приведена модификация преобразователя с изменяющейся индуктивностью так называемого плунжерного преобразователя. Преобразователь представляет собой катушку 1, из которой может выдвигаться ферромагнитный сердечник 2 (плунжер). При среднем положении плунжера индуктивность максимальна.

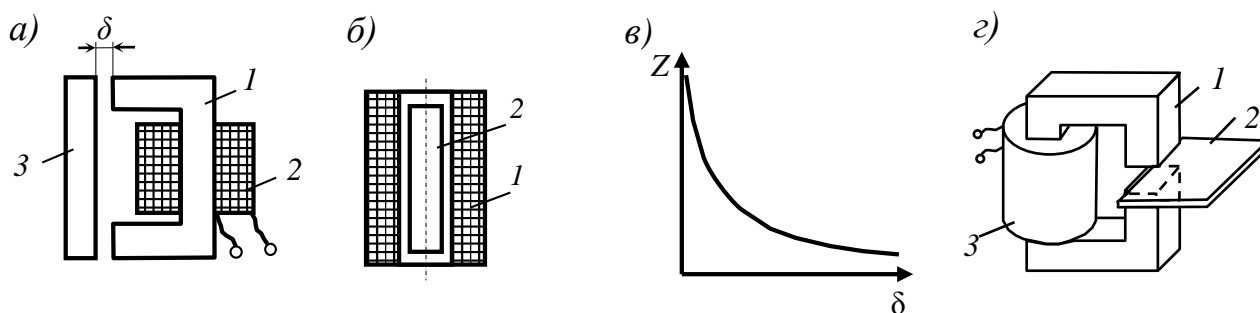


Рис. 2.20. Схемы индуктивных преобразователей:

а – с П-образным магнитопроводом и плоским якорем (*1* – П-образный магнитопровод; *2* – катушка; *3* – якорь); *б* – плунжерного типа (*1* – катушка; *2* – цилиндрический плунжер); *в*) – зависимость полного сопротивления от зазора; *з*) – преобразователь с изменяющимся активным сопротивлением (*1* – магнитопровод; *2* – пластинка с высокой электропроводностью для наведения вихревых токов; *3* – катушка)

График функции преобразования индуктивного преобразователя, приведенного на рис. 2.20, *а*, *б*, показан на рис. 2.20, *в*.

Одинарные индуктивные преобразователи имеют ряд недостатков:

- их функции преобразования нелинейны;
- аддитивные погрешности, в частности погрешность реального преобразователя, вызванная температурным изменением активного сопротивления обмотки, велики;
- сила притяжения якоря значительна, так как индуктивный преобразователь является электромагнитом, его сила притяжения, возрастающая с увеличением чувствительности, нелинейно зависит от перемещения якоря.

Для устранения этих недостатков используются дифференциальные преобразователи. Они состоят из двух одинаковых одинарных преобразователей, которые имеют общий подвижный элемент. Примеры схем таких преобразователей приведены на рис. 2.21. При перемещении якоря одна индуктивность (L_1) возрастает, другая (L_2) — уменьшается. Благодаря использованию этих цепей уменьшается аддитивная погрешность, улучшается линейность функции преобразования, в два раза возрастает чувствительность и уменьшается сила притяжения якоря.

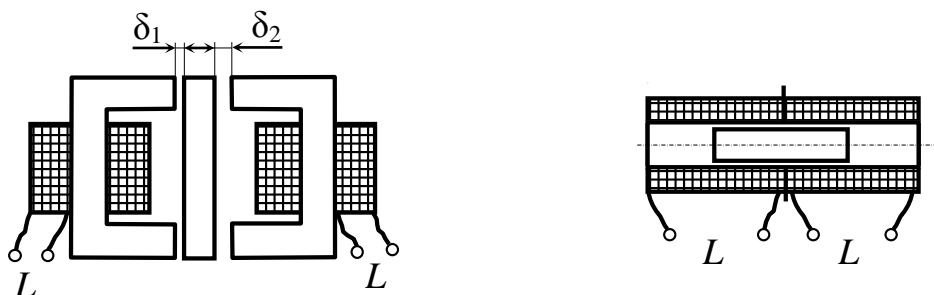


Рис. 2.21. Дифференциальные индуктивные преобразователи

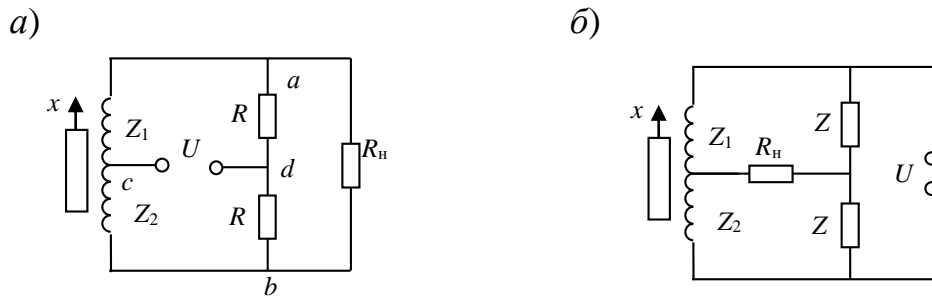


Рис. 2.22. Дифференциальные индуктивные преобразователи

Основными дифференциальными схемами включения индуктивных преобразователей являются мостовые схемы (рис. 2.22), где в общем случае $Z_1 = R_{\text{пр}} + j\omega L_1$ и $Z_2 = R_{\text{пр}} + j\omega L_2$ — полные сопротивления секций дифференциальных индуктивных преобразователей. Сопротивления других плеч могут быть как активными, так и реактивными. Источник питания U и нагрузка R_n могут меняться местами (рис. 2.22, а, б), при этом чувствительность моста также изменяется.

Изменения сопротивлений $\Delta Z_1 = j\omega \Delta L_1$ и $\Delta Z_2 = j\omega \Delta L_2$, соответствующие некоторому перемещению якоря относительно его среднего положения, в общем случае не равны между собой в силу нелинейности функции преобразования. Однако если перемещение мало, то их различия незначительны.

Изменения сопротивлений преобразователей обычно невелики, и можно считать, что напряжение на измерительной диагонали моста изменяется пропорционально $\Delta Z/Z$

2.4.3. Магнитоупругие преобразователи

Представляют собой разновидность индуктивного преобразователя с замкнутым ферромагнитным сердечником.

Электрическое сопротивление преобразователя изменяется вследствие изменения магнитной проницаемости сердечника, вызываемого механическими напряжениями, возникающими от действия на сердечник механической силы. Изменение магнитных свойств материалов (индукции или магнитной проницаемости) под влиянием механических деформаций называется *магнитоупругим эффектом*. Магнитоупругий эффект обратим: ферромагнитное тело, внесенное в магнитное поле, изменяет свои размеры, то есть деформируется. Такого рода явление называется *магнитострикционным эффектом* и используется, например, в возбуждателях ультразвуковых колебаний.

Как известно, ферромагнитные вещества имеют области самопроизвольного намагничивания (*домены*). В ненамагниченном состоянии вещества домены ориентированы хаотично и магнитные моменты отдельных доменов компенсируют друг друга. При помещении ферромагнитного тела в магнитное поле домены ориентируются в его направления. В слабом поле ориентация частичная; в сильном поле при магнитном насыщении материала ориентируются все домены. Ориентация доменов вызывает увеличение магнитной индукции, характерное для ферромагнитных материалов.

Если на намагниченный образец ферромагнитного тела воздействовать внешней механической силой, то тело под действием этой силы будет деформироваться, домены изменят свою ориентацию и индукция в материале изменится. Явление имеет упругий характер. Если снять силу, то индукция примет прежнее значение. Поскольку абсолютная магнитная проницаемость вещества

$$\mu_a = \mu_r \mu_0 = B/H,$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость среды, μ_0 — магнитная постоянная, то при заданной напряженности поля H изменение магнитной индукции B эквивалентно изменению магнитной проницаемости.

Рассмотренное явление используется для преобразования механической силы в электрическую величину. Преобразователи продольного сжатия (рис. 2.23, *а*, *в*, *г*) изготавливают, как правило, из сплошного, реже из листового материала. Преобразователь, применяемый для измерения деформаций (рис. 2.23, *б*), представляет собой тонкий лист из пермаллоя (никелевого сплава) *1* со специальной выпуклой выштамповкой *2*, наклеиваемый на исследуемую деталь *3*. Магнитопровод преобразователя, образованный частями *1* и *2*, подвергаясь деформации, изменяет свое магнитное сопротивление. Магнитоупругие преобразователи могут иметь две обмотки (рис. 2.23, *в*, *г*). Такие преобразователи являются *трансформаторными*. При действии силы вследствие изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктивность между обмотками и ЭДС вторичной обмотки.

Магнитоупругий преобразователь взаимноиндуктивного типа (рис. 2.23, *г*) основан на явлении анизотропных свойств ферромагнитных тел при их деформации. При отсутствии деформации магнитный поток намагничивающей катушки *1* благодаря изотропным свойствам (по магнитной проницаемости) сердечника при $F = 0$ практически не сцепляется с измерительной катушкой *2*, вследствие чего наводимая в ней ЭДС равна нулю (рис. 2.24, *а*). Сжатие сердечника (рис. 2.24, *б*) приводит к тому, что в плоскости, перпендикулярной действию силы F , магнитная проницаемость сердечника становится больше, чем в направлении действия силы, ввиду чего происходит изменение конфигурации магнитного потока в сердечнике и появляется ЭДС в измерительной катушке.

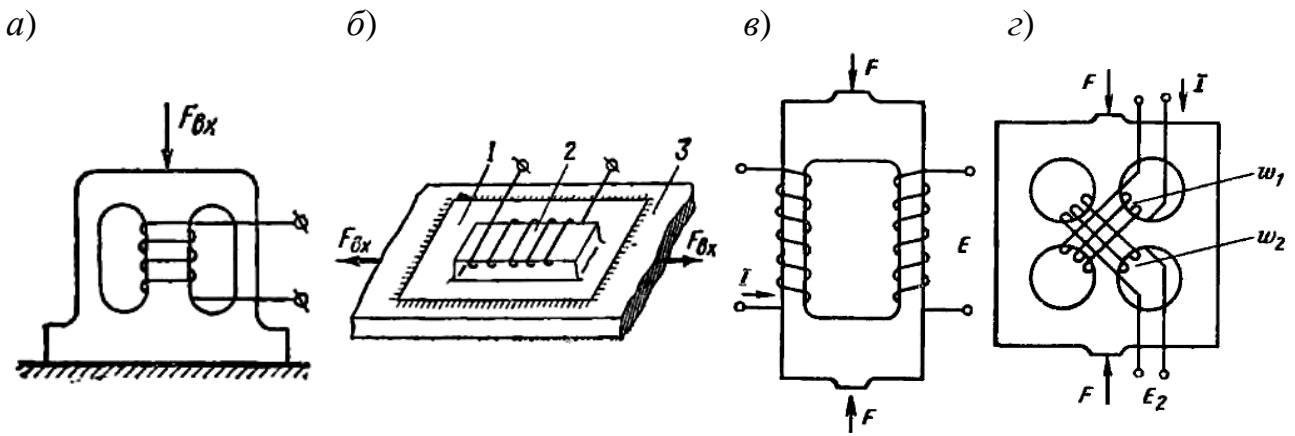


Рис.2.23. Типы магнитоупругих преобразователей:
a, б – с одной катушкой; *в, г* – с двумя катушками (трансформаторные)

При небольших механических напряжениях (деформациях) можно считать, что относительное изменение магнитной проницаемости пропорционально механическому напряжению σ и соответственно относительной деформации

$$S_{\mu} = \frac{\Delta\mu / \mu}{\Delta l / l},$$

где S_{μ} — магнитоупругая чувствительность, характеризующая материал сердечника преобразователя. Для материалов типа пермаллой S_{μ} достигает значения 200 и более.

Наибольшую чувствительность S_{μ} имеют железоникелевые сплавы, меньшую — железокобальтовые сплавы и кремниевые стали. Так, электротехнические стали имеют чувствительность порядка $11 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{Н}$, сталь марки СтЗ — $8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{Н}$. Имеются сплавы с чувствительностью $25 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{Н}$.

Измерительные цепи магнитоупругих преобразователей аналогичны схемам для индуктивных и взаимоиндуктивных преобразователей.

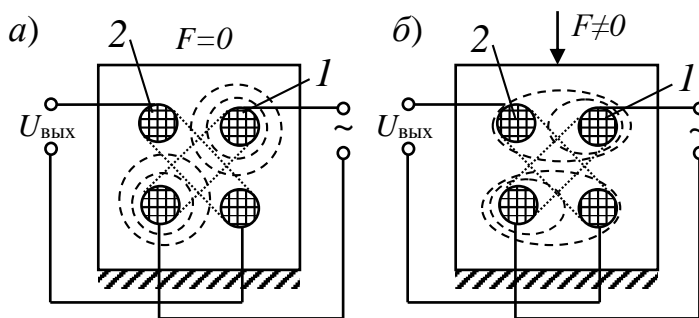


Рис. 2.24. Формирование сигнала в измерительной катушке

Погрешность от магнитоупругого гистерезиса обусловлена невоспроизводимостью магнитного состояния преобразователя при его нагрузке и разгрузке. Расхождение значений $\Delta\mu/\mu = f(F)$ при первом цикле нагрузки и разгрузки достигает в ряде случаев 10% и более. После многократной нагрузки и разгрузки это расхождение снижается до 1 % и сохраняется в дальнейшем. В связи с этим практикуют «тренировку» преобразователя при номинальной нагрузке.

Механические напряжения в сердечнике должны быть, как показывает опыт, в шесть-семь раз меньше предела упругости материала. Для улучшения стабильности магнитных характеристик сердечника преобразователя рекомендуется «естественное старение» преобразователя в течение нескольких месяцев после его изготовления.

Погрешность, вызываемая колебаниями намагничивающего тока, обусловлена изменениями магнитной проницаемости сердечника и магнитоупругой чувствительности. Для уменьшения этой погрешности предпочтительно выбирать такое значение тока, при котором сердечник работал бы при напряженности магнитного поля, соответствующей максимальной магнитной проницаемости. При этом условии погрешность не превышает 0,3–0,4% на 1% колебания напряжения источника питания.

Температурная погрешность лежит в пределах 0,5–1,5% на 10°C.

Магнитоупругие преобразователи применяются для измерения больших (10^5 – 10^6 Н) сил и давлений в трудных условиях эксплуатации. Несмотря на сравнительно низкую точность приборов с магнитоупругими преобразователями (3–5%), благодаря простоте конструкции и высокой надежности, их применяют для контроля сил, действующих на различные механизмы в полевых условиях (например, нефтепромыслах), давлений и крутящих моментов в буровых колонках, сил резания в процессе обработки металлов и др.

2.4.4. Емкостные преобразователи

Емкостный преобразователь представляет собой электрический конденсатор, параметры которого изменяются под действием входной величины. Конденсатор состоит из двух электродов. Пространство между электродами заполнено диэлектриком. При изменении диэлектрической проницаемости среды между электродами или изменении взаимного положения электродов изменяется емкость конденсатора.

Емкость плоского конденсатора определяется выражением

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 F}{\delta}.$$

где δ — расстояние между электродами; F — их площадь; ε_0 — диэлектрическая постоянная; ε_r — относительная проницаемость диэлектрика.

Емкость цилиндрического конденсатора определяется выражением

$$C = \frac{2\pi l \varepsilon_r \varepsilon_0}{\ln(d_2/d_1)},$$

где l – длина активной части электродов конденсатора; d_1, d_2 – внутренний и внешний диаметры электродов цилиндрического конденсатора.

Изменение любого из входящих в выражения параметров ($\delta, F, \varepsilon_r, l$), функционально связанных с изменяемой неэлектрической величиной, изменяет емкость конденсатора.

У преобразователя с прямоугольными электродами (рис. 2.25, д) $F = bx$, и имеется некоторый диапазон перемещения пластин x , в котором емкость линейно зависит от x (рис. 2.25, е). Линейная зависимость может искажаться вследствие краевого эффекта. В области линейной зависимости чувствительность такого преобразователя

$$S = \frac{dC}{dx} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 b}{\delta}$$

постоянна и увеличивается с уменьшением расстояния между электродами δ .

Если изменяется расстояние δ между электродами, функция преобразования $C = f(\delta)$ представляет собой гиперболическую функцию (рис. 2.25, б). Чувствительность преобразователя

$$S = \frac{dC}{d\delta} = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 F}{\delta^2}$$

сильнее, чем в предыдущем случае, зависит от расстояния между пластинами δ . Для увеличения чувствительности S целесообразно уменьшить δ .

Если перемещать диэлектрическую пластину в зазоре плоского конденсатора (рис. 2.25, ж), то можно получить преобразователь с переменной диэлектрической проницаемостью. Емкость такого преобразователя определяется как емкость двух параллельно включенных конденсаторов. Если пластинка с относительной диэлектрической проницаемостью ε_r имеет толщину δ , равную расстоянию между электродами, то функция преобразования преобразователя описывается выражением

$$C = \frac{\varepsilon_0 [F + F_\varepsilon (\varepsilon_r - 1)]}{\delta},$$

где F — площадь электродов; F_ε — часть площади диэлектрической пластины, находящаяся между электродами (рис. 2.25, к).

Измерительные схемы включения. Для включения не дифференциального преобразователя может использоваться резонансная цепь (рис. 2.26, а).

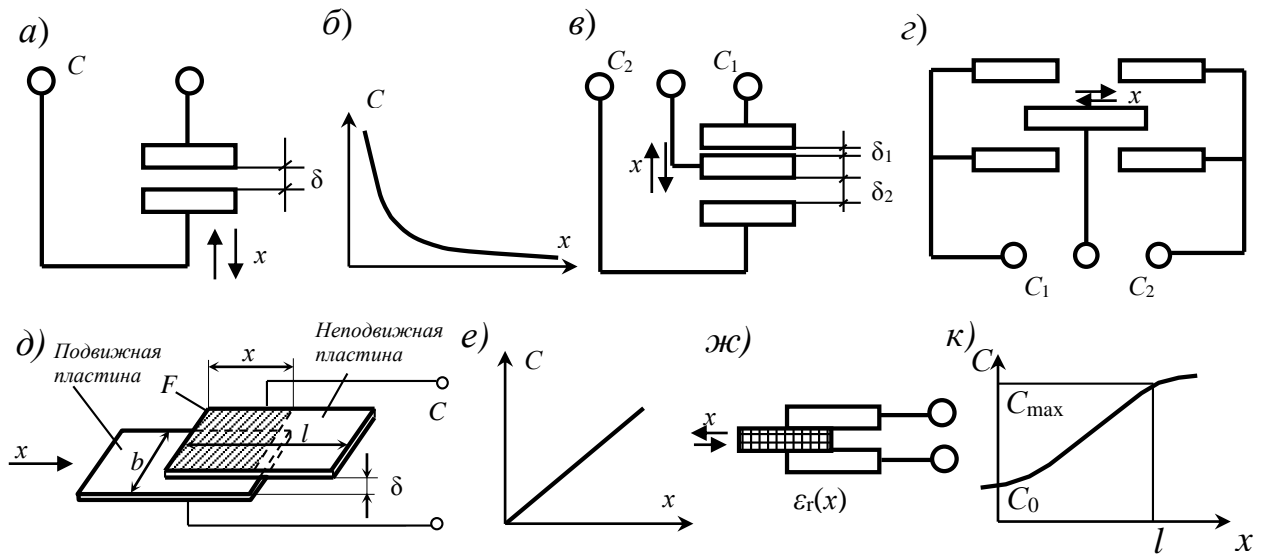


Рис. 2.25. Конструкции емкостных преобразователей:

a – с переменным зазором; *б* – зависимость емкости от зазора; *в* – дифференциальный емкостный преобразователь с переменным зазором; *г* – дифференциальный емкостный преобразователь с переменной активной площадью электродов; *д* – емкостный преобразователь с переменной площадью; *е* – зависимость емкости от положения пластины с переменным зазором; *ж* – с изменяющейся диэлектрической проницаемостью; *к* – зависимость емкости от положения диэлектрика

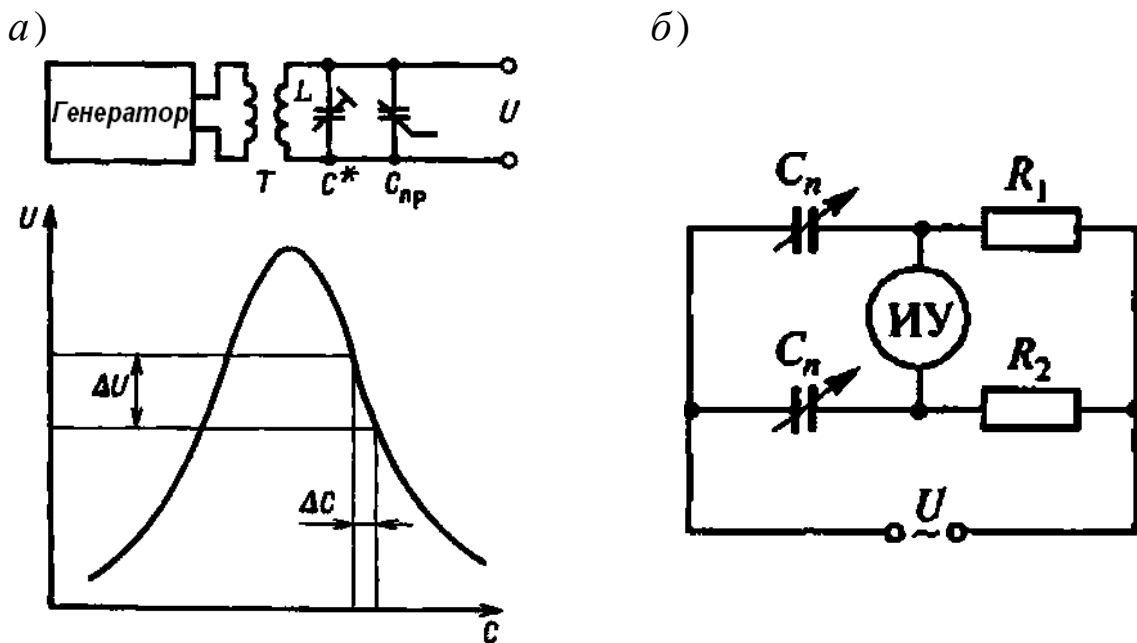


Рис. 2.26. Измерительные схемы включения:

a – резонансная схема (недифференциальные преобразователи);
б – мостовая схема включения дифференциальных преобразователей

При изменении емкости, напряжение на контуре изменяется по резонансной кривой, как показано на рис. 2.26, *а*. При изменении емкости преобразователя на ΔC напряжение на контуре изменяется на ΔU .

Для включения дифференциального емкостного преобразователя используется мостовая цепь (рис. 2.26, *б*), работающая в неравновесном режиме.

Достоинства емкостных преобразователей. Конструкции емкостных датчиков просты, имеют малые массу и размеры. Подвижные электроды могут быть достаточно жесткими, с высокой собственной частотой, что дает возможность измерять быстропеременные величины. Емкостные преобразователи можно выполнять с заданной (линейной или нелинейной) функцией преобразования. Для получения требуемой функции преобразования часто достаточно изменить форму электродов. Отличительной особенностью является малая сила притяжения электродов.

Недостатки. Основными недостатками емкостных преобразователей являются их малая емкость и высокое сопротивление. Для его уменьшения преобразователи питаются напряжением высокой частоты. Однако это приводит к усложнению вторичных преобразователей.

Емкостные преобразователи широко применяются в научно-исследовательской работе, а также на производстве в качестве датчиков поточных линий.

2.4.5. Преобразователи, основанные на эффекте Холла

Эффект Холла заключается в следующем: если проводник с протекающим по нему током помещается в магнитное поле так, что направление тока оказывается перпендикулярным магнитным силовым линиям, то образуется поперечное электрическое поле, пропорциональное произведению плотности магнитного потока и силе электрического тока.

Этот эффект возникает в проводниках, однако наиболее сильно проявляется в полупроводниках.

Пусть образец имеет форму прямоугольной пластинки длиной l , шириной b , толщиной d (рис. 2.27).

Если вдоль образца пропустить электрический ток I (точки 1–2), а перпендикулярно плоскости пластинки создать магнитное поле B , то на боковых плоскостях пластинки в направлении 3–4 возникнет электрическое поле, которое называют *полем Холла*. На практике, как правило, поле Холла характеризуют разницей потенциалов, которую измеряют между симметричными точками 3 и 4 на боковой поверхности образца.

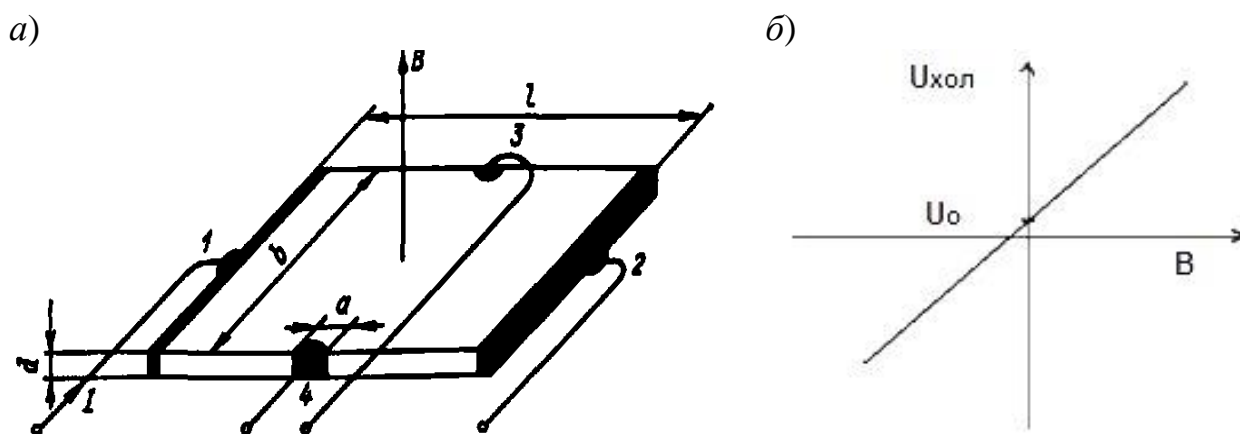


Рис. 2.27. Схема преобразователя:
a – пластина преобразователя; *б* – зависимость напряжения выхода от магнитной индукции

Эта разница потенциалов называется разницей потенциалов Холла $U_{\text{хол}}$ или ЭДС Холла, которая определяется по формуле

$$E_{\text{хол}} = IBR_n/d,$$

где $R_n = 1/(e \cdot n)$ — коэффициент Холла; n — число зарядов, протекающих через единицу объема и образующих электрический ток в проводнике или полупроводнике; e — заряд носителя зарядов.

Таким образом, ЭДС Холла (или $U_{\text{хол}}$) пропорциональна силе тока, индукции магнитного поля, и обратно пропорциональна толщине образца и концентрации носителей тока в нем.

Использование полупроводников обусловлено тем, что благодаря высокой подвижности носителей тока они имеют большую чувствительность к влиянию магнитного поля. Чувствительный элемент может изготавливаться как из объемного материала, так и на основе полупроводниковых пленок на изолирующих подложках, может иметь различную форму, что влияет на линейность зависимости выходного сигнала от магнитного поля и чувствительность. Размеры современных датчиков Холла могут не превышать $1 \times 1 \times 0,5$ мм, токи питания как правило 1–100 мА (зависит от величины входного сопротивления датчика), чувствительность может достигать 1000 мВ/Тл и более, рабочий диапазон температур от -270 до $+200$ °С.

С точки зрения метрологии датчикам Холла как элементам измерительных систем, присущи следующие виды погрешностей:

- *погрешность нуля.* Этот вид погрешности, обусловленный дрейфом остаточного напряжения, тяжелее всего устраняется. Погрешность нуля является основной причиной, которая снижает возможность применения преобразователей Холла для измерения слабых магнитных полей;

- *погрешность линейности.* Определяет отклонение исходной величины от линейной зависимости при равномерном изменении индукции. В диапазоне от 0 до 10 Тл нелинейность может составить 1–10 %. Малую погрешность линейности 0,2% при магнитной индукции до 1 Тл имеют датчики из арсенида-фосфида индия (InAsP);
- *погрешность от собственного магнитного поля датчика.* Этот тип погрешности определяется конструктивными особенностями датчика, который приводит к асимметрии магнитного поля;
- *погрешность направленности.* Обусловлена пространственным расположением датчика по отношению к вектору магнитной индукции;
- *временная стабильность.*

2.4.6. Ионизационные (радиационные) преобразователи

Принцип работы приборов основан на явлении ионизации газа или люминесценции некоторых веществ под воздействием ионизирующих излучений, в качестве которых могут применяться ионизирующие α -, β - и γ -излучения радиоактивных веществ, или рентгеновские излучения.

В общем виде измерительный преобразователь, показанный на рис. 2.28 представляет собой сосуд с газом и двумя электродами, к которым подведено питающее напряжение.

При помещении камеры в пространство с ионизирующим излучением, находящийся в ней газ ионизируется. Если к электродам приложить напряжение U , то ионы газа образуют ток.

Величина тока I его зависит от приложенного к электродам напряжения U , плотности и состава газа, размера камеры и электродов, свойств и интенсивности J ионизирующего излучения и т. д.

На рис. 2.29 приведена зависимость тока преобразователя от величины напряжения и интенсивности излучения. На участке A с ростом величины напряжения увеличивается количество ионов газа, доходящих до электродов (линейная зависимость от U). На участке B ток не зависит от U , так как все ионы участвуют в формировании тока (участок насыщения). На участке B происходит рост тока за счет вторичной ионизации, а на участке Γ ток уже практически не зависит от первичной ионизации, участок D – это непрерывный разряд, ток I не зависит от интенсивности излучения J .

Для измерения степени ионизации используются ионизационные камеры (участок A и B вольт-амперной характеристики), ионизационные счетчики — пропорциональные, Гейгера-Мюллера, полупроводниковые (участки B и Γ). Иногда используются сцинтиляционные счетчики (люминисцентные), которые основаны на появлении световых вспышек (сцинтилляций) в некоторых веществах — фосфорах (активированный серебром сернистый цинк, сернистый кадмий и др.) под воздействием излучения.

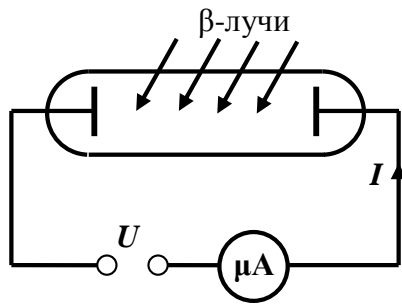


Рис. 2.28. Ионизационная камера

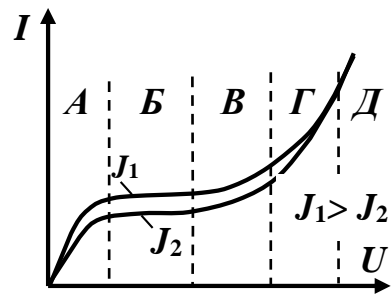


Рис. 2.29. Вольтамперная характеристика

Между электродами 2 и 3 приложена разность потенциалов (рис. 2.30), достаточная для достижения тока насыщения. При изменении давления P мембрана прогибается, изменяя расстояние между электродами и значение ионизационного тока.

Измерительные цепи. Так как токи ионизационных преобразователей малы — порядка 10^{-10} – 10^{-15} А, то для его измерения последовательно с преобразователем ставят большое сопротивление (10^9 , 10^{10} Ом). Полученное напряжение усиливают и измеряют милливольтметрами или потенциометрами.

Погрешности ионизационных преобразователей:

- с течением времени интенсивность излучения источника уменьшается за счет естественного распада;
- ядерный распад носит случайный характер как по времени распада и по траектории частицы распада, так и по захвату частиц веществом. Для уменьшения случайной погрешности необходимо увеличить время измерения.

Достоинства преобразователей:

- возможность бесконтактных измерений;
- отсутствие влияния изменения внешних условий (температуры, давления, напряжения питания).

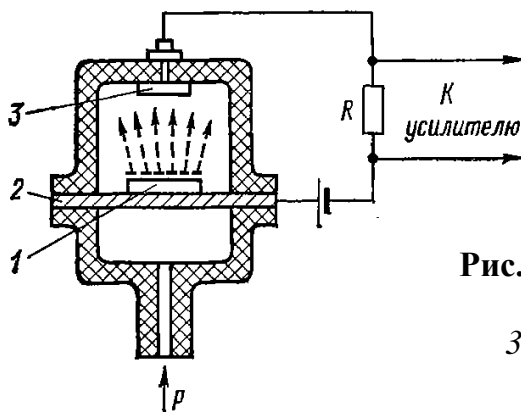


Рис. 2.30. Устройство мембранного манометра:

- 1 – α - или β - излучатель; 2 – мембрана;
- 3 – неподвижный электрод, изолированный от мембраны 2

Недостатки преобразователей:

- необходимость применения биологической защиты.

Область применения: измерения плотности и состава веществ, геометрических размеров, изделий, механических величин и т.д. Особенностью является возможность работы с агрессивными и взрывоопасными средами, при их больших давлениях и высоких температурах.

2.4.7. Электронные преобразователи (механотроны)

Преобразователь представляет собой вакуумную или газонаполненную лампу, у которой один или два электрода механически связаны с измерительным стержнем и подвижны по отношению к остальным электродам и баллону лампы (рис. 2.31). Чувствительность механотронных преобразователей достигает $0,3 \text{ В/мкм}$, нелинейность их характеристики в определенных условиях не превышает сотых долей процента, а частотная характеристика механотронных преобразователей некоторых типов такова, что с их помощью без заметных потерь точности можно контролировать изменения размера за тысячные доли секунды.

Низкое выходное сопротивление механотронов, хорошая чувствительность и питание постоянным током дают возможность строить простые электронные устройства без усилителей, генераторов и других функциональных узлов.

К недостаткам механотронных преобразователей следует отнести большее, по сравнению с индуктивными и емкостными преобразователями, потребление энергии и требуемое для подготовки к работе время, а также увеличенные габаритные размеры. Механотронные преобразователи применяются в основном при измерении малых линейных перемещений.

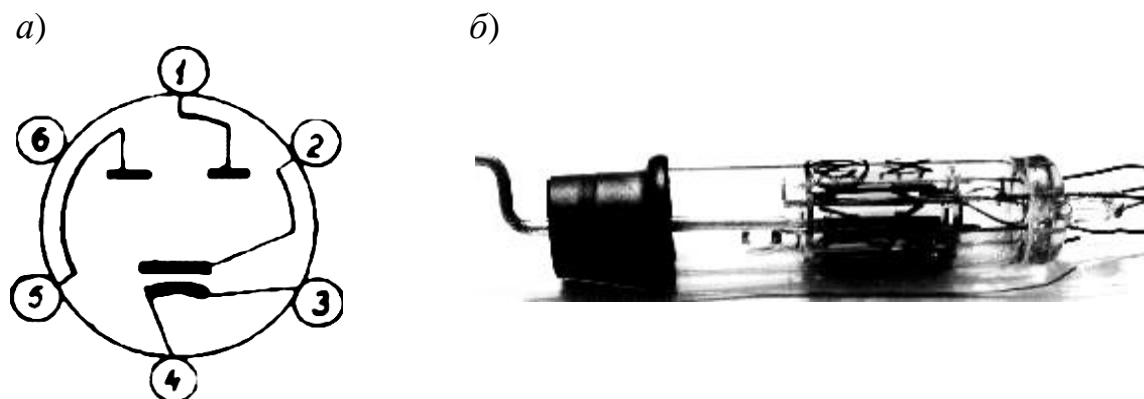


Рис. 2.31. Механотронный преобразователь:

a – схема преобразователя; *б* – общий вид;

1 – анод подвижный; *2* – катод; *3, 4* – подогреватель; *5* – анод неподвижный

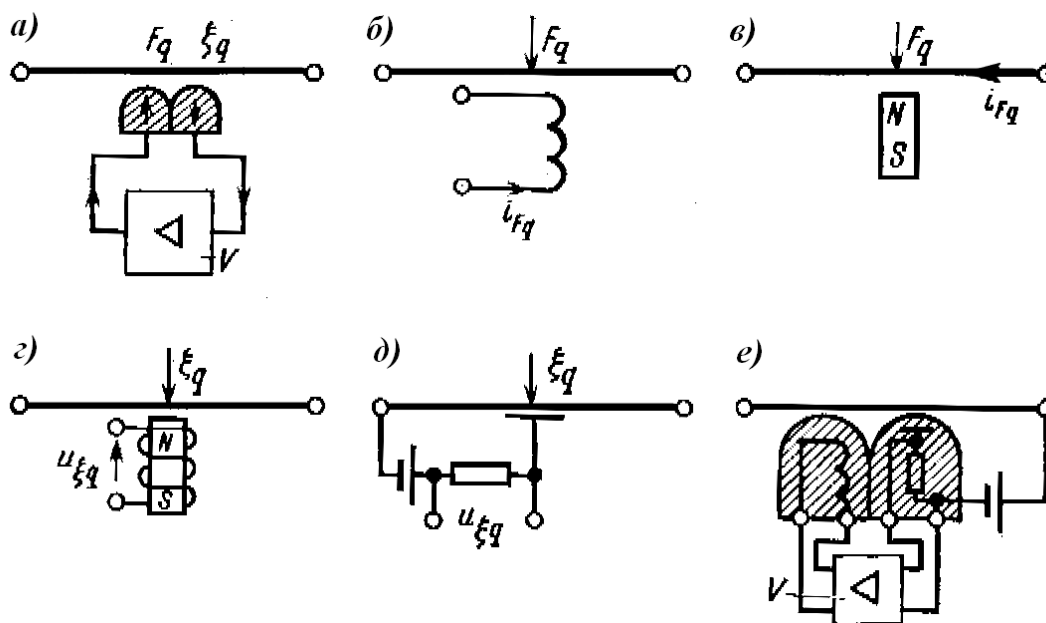


Рис. 2.32. Схемы возбуждения колебаний струны:

a – принципиальная схема; *b* – притяжение магнитной струны; *в* – притяжение немагнитной струны; *г* – модуляция магнитной струной; *д* – модуляция магнитной и немагнитной струнами; *е* – принципиальная схема возбуждителя-модулятора для магнитной струны

2.4.8. Струнные (вибросчастотные) преобразователи

Струнные преобразователи представляют собой автогенераторы, частота колебаний которых определяется параметрами струны – высокодобротной механической системы с линейно-распределенными параметрами, и поддерживается с помощью электронного усилителя с положительной обратной связью (рис. 2.32).

Чувствительный элемент струнного преобразователя — натянутая вольфрамовая или стальная струна (или несколько струн). Действие струнного преобразователя основано на зависимости собственной частоты колебаний струны f_0 от её длины l , массы m и силы натяжения F (либо механического напряжения σ или удлинения Δl):

$$f_0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E \Delta l}{\rho l^3}},$$

где ρ и E — соответственно плотность и модуль упругости материала струны. Основные элементы струнного преобразователя: механическая система со струной (струнами) и вторичный преобразователь (обычно электромагнитного или магнитоэлектрического типа), преобразующий изменение частоты колебаний механической системы в изменение параметра электрической цепи.

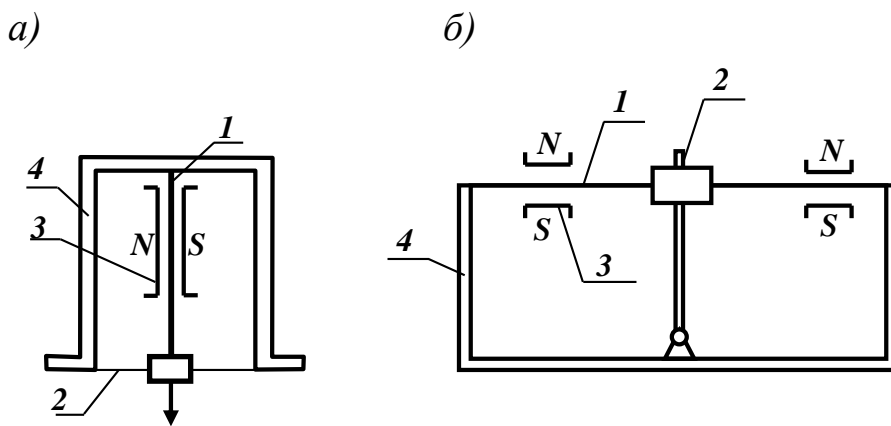


Рис. 2.33. Струнные преобразователи:

a – однострунный; *б* – дифференциальный (двухструнный); 1 – струна;
2 – подвес или рычаг; 3 – магниты возбуждения; 4 – корпус

Струнные преобразователи делятся на однострунные (рис. 2.33, *a*) и дифференциальные, имеющие две идентичные струны (рис. 2.33, *б*). Дифференциальное включение струн позволяет значительно уменьшить влияние окружающей среды (температуры, давления) на результаты преобразования входного параметра.

Основной недостаток однострунных преобразователей — резко нелинейная статическая характеристика; у дифференциальных струнных преобразователей нелинейность статической характеристики значительно меньше. Точность преобразования струнных преобразователей увеличивается, если основной составляющей жёсткости механической системы является жёсткость струны. Пример струнного преобразователя — струнный дифференциальный гравиметр, имеющий относительную, погрешность преобразования не выше $\pm(10^{-6}-10^{-8})$. Струнный гравиметр — статический гравиметр, в котором под действием силы тяжести изменяется частота собственных колебаний гибкой струны.

Измерительная часть *струнного преобразователя*, как правило, выполнена по схеме моста. *Струнные преобразователи* по габаритам примерно сравнимы с резисторными или электромагнитными преобразователями, и, следовательно, для них пригодны такие же типы упругих элементов.

Качество *струнных преобразователей*, как и любых измерительных преобразователей, зависит от чувствительности, пределов преобразования, погрешности установки на нуль, погрешности чувствительности, погрешности нелинейности.

Использование *струнных преобразователей* позволяет широко применять средства дискретной вычислительной техники. Простота преобразования частоты в цифровой код является значительным преимуществом цифровых информационных систем - машин централизованного контроля, входящих в частотно-ферродинамическую систему. В таком коде число

представляется серией импульсов за фиксированный промежуток времени. Импульсы подсчитываются электронными счетчиками, работающими в соответствующих системах счисления. Операция интегрирования сводится к подсчету импульсов за время интегрирования. Наиболее широко применяются *струнные преобразователи*, обладающие высокой чувствительностью, малой погрешностью, небольшой инерционностью, малым потреблением энергии для возбуждения собственных колебаний струны, возможностью преобразования в частоту различных физических величин и высокой надежностью.

К недостаткам *струнного преобразователя* следует также отнести нелинейность его характеристики.

На рис. 2.34 показан внешний вид виброчастотного преобразователя электронных весов фирмы «ТВЕС», а на рис. 2.35 — общий вид настольных весов. На основании 1 установлен упругий элемент 2, в отверстии которого находится струна 3, выполненная заодно с упругим элементом. По обе стороны от струны находятся катушки электромагнита 4 и преобразователя 5 индуктивного типа. К верхней поверхности упругого элемента крепится жесткая пластина 6 с опорами 7, на которые помещается основание грузоприемной платформы. Для ограничения деформации упругого элемента установлен предохранительный стержень 8.

Электромагнит и преобразователь перемещений, совместно с усилителем образуют автогенератор, в котором постоянно происходит вибрация струны на собственной частоте 5–6 кГц. Под действием силы тяжести груза P происходит деформация упругого элемента 2 и натяжение струны 3, что вызывает увеличение механического напряжения в струне и повышение собственной частоты ее колебаний.

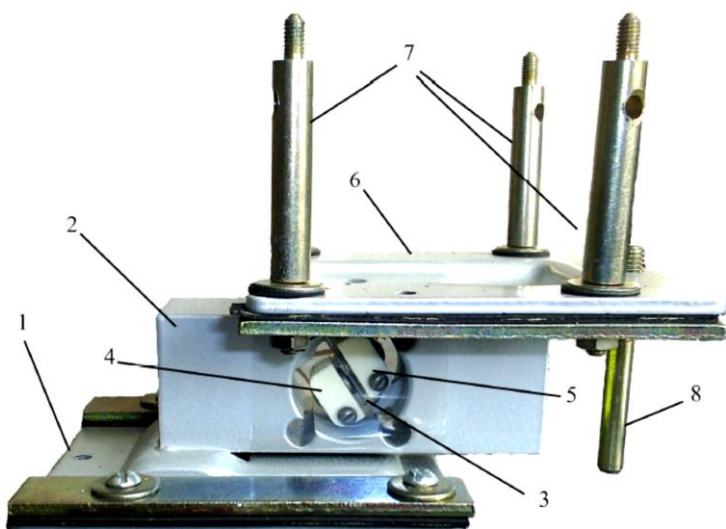


Рис. 2.34. Виброчастотный преобразователь весов фирмы «ТВЕС»



Рис. 2.35. Общий вид настольных весов фирмы «ТВЕС»

2.4.9. Волоконно-оптические преобразователи

Это относительно новый, развивающийся вид преобразователей, которые обладают рядом преимуществ по сравнению с другими видами преобразователей.

Оптическое волокно представляет собой очень тонкую длинную нить, состоящую из сердечника и наружной оболочки. Сердечник представляет собой нить из пластика или стекла с определенными добавками (как правило, германий) для повышения коэффициента преломления. Сердечник (сердцевина) служит каналом для передачи энергии излучения. Оболочка предохраняет поверхность сердечника от загрязнений и повреждений, а также препятствует рассеянию передаваемого излучения с поверхности волокна в стороны.

Сердечник волокна обычно имеет форму правильного вытянутого цилиндра, а оболочка — форму трубки, насаженной на цилиндр. И сердечник, и оболочка делаются из материалов, прозрачных для передаваемого излучения. Но оптические свойства этих преобразователей неодинаковы: сердечник имеет более высокий коэффициент преломления, чем оболочка. Коэффициент преломления сердцевин n_1 примерно на 0,01–0,02 превышает коэффициент преломления оболочки n_2 . Благодаря этому луч света, направленный в сердцевину, распространяется по ней, многократно отражаясь от границы раздела «сердцевина-оболочка». Диаметр отдельного волокна в пределах 5–50 мкм, толщина оболочки 0,5–2 мкм. Такая конструкция дает главное свойство волокну: его способность передавать энергию излучения за счет полного внутреннего отражения лучей от поверхности раздела сердечника и оболочки.

Толстое волокно обладает меньшими потерями энергии, и его легче изготовить, но в этом случае ухудшается разрешающая способность пучка волокон, следовательно, снижается возможная плотность передачи информации. Тонкие волокна трудно вытягивать, собирать и укладывать в пучки.

Волоконно-оптические датчики можно разделить на две группы: датчики с волокном в качестве линии передачи и с одномодовым волокном в качестве чувствительного элемента. Наиболее отработаны в теоретическом и технологическом отношении и постепенно осваиваются в промышленном производстве волоконно-оптические датчики первого типа. Их можно условно поделить на датчики с оптическим преобразователем и датчики с оптическим зондом.

Датчики с оптическим преобразователем представляют собой систему, которая содержит оптический элемент, чувствительный к воздей-

ствию измеряемой физической величины, излучатель и приемник. Оптический элемент (преобразователь) помещен между торцами передающего и приемного многомодового волокна. В качестве излучателя обычно используют малошумящий светодиод, а в качестве детектора света — *p-i-n фотодиод*. Эти полупроводниковые элементы должны быть электро- и термостабильными.

В датчиках с оптическим зондом зондирующий световой луч, отраженный или рассеянный объектом измерения, поступает в приемную оптическую систему, состоящую из объектива и волокна, выходной торец которого связан с *p-i-n-фотодетектором*.

В датчиках этого типа могут быть использованы многомодовые или одномодовые оптические кабели, а также волоконно-оптические жгуты. В качестве источника света в зависимости от вида измеряемой величины (интенсивность, поляризация, фаза) используются светодиоды или лазеры. Волоконно-оптические датчики на этом принципе отличаются высокой чувствительностью и могут быть использованы для бесконтактных измерений. В качестве примера рассмотрим преобразователь давления, схематично показанный на рис. 2.36.

Мембрана 2 диаметром 1 мм и толщиной 18 мкм изготовлены из металлизированной полиэфирной пленки (рис. 2.36). Пучок осветительных световодов 4, соединенных с источником света, отделен от пучка приемных световодов 2, непрозрачной перегородкой 3. Торцы обоих световодных жгутов установлены на расстоянии 50 мкм от светоотражающей поверхности мембраны; при этом световой поток, поступающий из осветительных световодов в приемные, зависит от прогиба мембраны под действием давления.

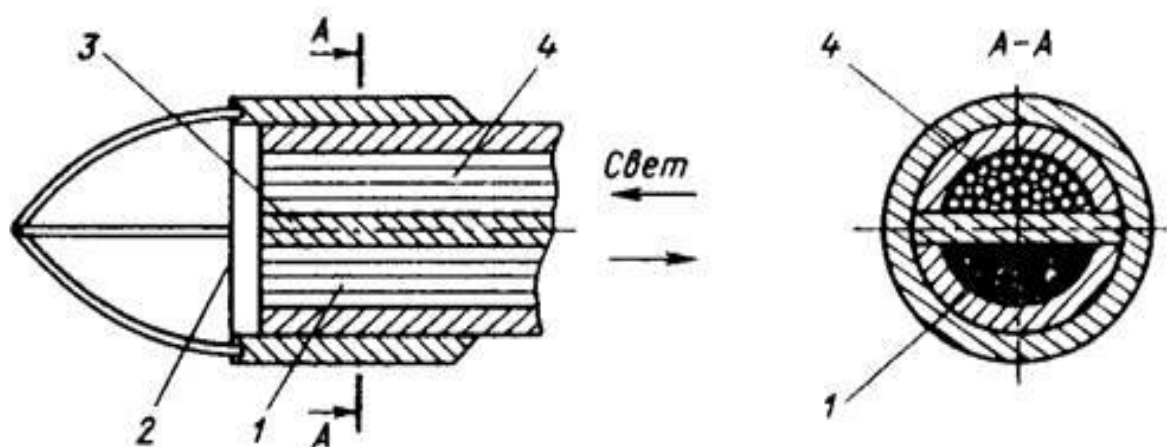


Рис. 2.36. Волоконно-оптический преобразователь давления

2.4.10. Электрохимические преобразователи (хемотроны, солионы)

Электрохимическими преобразователями, или хемотронами (солио-нами) называют преобразователи, принцип действия которых основан на законах электрохимии. Такие электрохимические системы выполняют роли диодов, датчиков, интеграторов, запоминающих устройств и соответственно выполняют функции выпрямления, усиления и генерирования электрических сигналов, а также функции измерения неэлектрических величин. В преобразователях используются обратимые окислительно-восстановительные системы.

Наибольшее распространение получила система, образуемая водным раствором йодистого калия (KI), с небольшими добавками йода I_2 , и платиновыми электродами. При пропускании через электролит тока при напряжениях, превышающих 0,15–0,2 В, электрохимическая реакция вступает в область диффузионной кинетики (то есть определяется только скоростью диффузии ионов в растворе и не зависит от приложенного напряжения). В этом случае ток через электролит приблизительно может быть определен по формуле

$$I = \frac{zFDC_0S}{\delta},$$

где F – постоянная Фарадея; z – число электронов, участвующих в процессе разряда иона на электроде; D – коэффициент диффузии ионов; C_0 – концентрация реагирующих ионов в глубине раствора; S – площадь электрода; δ – толщина диффузионного слоя.

Если с помощью внешних воздействий изменять перечисленные в формуле величины, то можно построить преобразователи переменных давлений, механических перемещений, параметров вибрации, скорости движения жидкости. Частотный диапазон преобразователей ограничен полосой от 0,01 до 200 Гц. Принципиальная схема преобразователя давления показана на рис. 2.37.

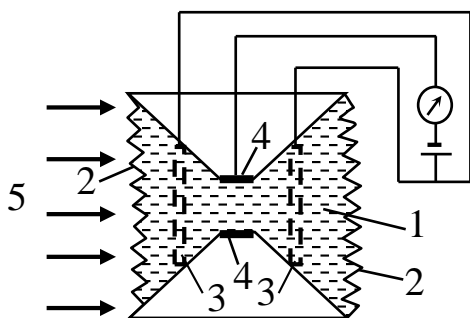


Рис. 2.37. Схема преобразователя давления:
1 – электролит; 2 – гибкие мембраны;
3 – сетчатые платиновые аноды;
4 – платиновый катод; 5 – давление

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

3.1. Классификация средств измерений

Измерения выполняют с помощью технических средств. Средством измерения (СИ) называют техническое устройство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики. По функциональному назначению *средства измерения* можно разделить на следующие группы (схема классификации приведена на рис. 3.1):

- меры;
- измерительные преобразователи;
- измерительные приборы;
- измерительные информационные системы;
- измерительные установки.

Меры предназначены для воспроизведения физической величины заданного размера.

Измерительным преобразователем (ИП) называют средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь, к которому непосредственно подводится физическая величина, называется *первичным измерительным преобразователем* (ПИП).

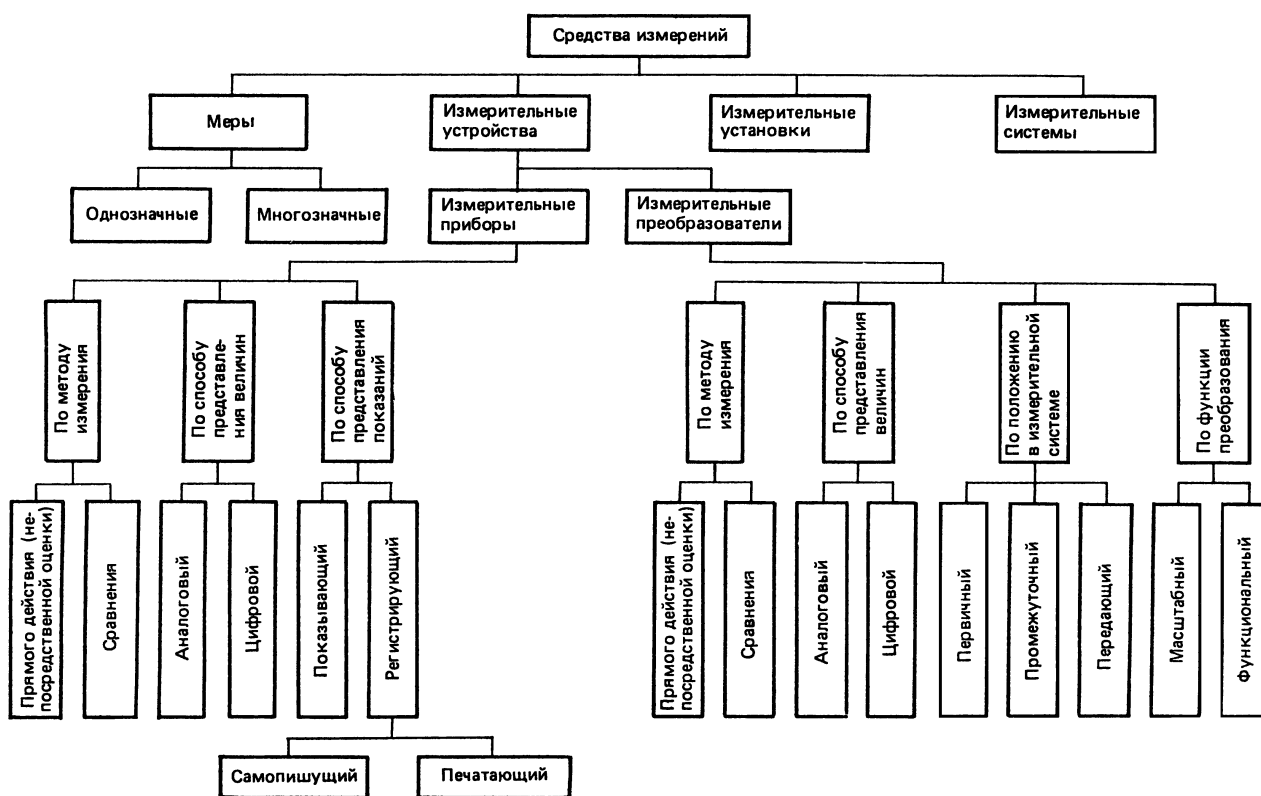


Рис. 3.1. Обобщенная структурная схема классификации средств измерений

Измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины в заданное число раз, называется *масштабным измерительным преобразователем*.

В зависимости от рода измеряемой величины на входе измерительного преобразователя разделяют на следующие группы:

- преобразователи электрических величин;
- преобразователи неэлектрических величин.

В зависимости от вида входного и выходного сигналов:

- аналоговые измерительные преобразователи, у которых на входе и выходе аналоговые сигналы;
- аналого-цифровой измерительный преобразователь (АЦП), у которого на входе аналоговый сигнал, а на выходе кодированный цифровой сигнал;
- цифро-аналоговый измерительный преобразователь (ЦАП), у которого на входе кодированный цифровой сигнал, а на выходе аналоговый (квантованный) сигнал.

Первичные измерительные преобразователи, размещаемые непосредственно на объекте исследования и удаленные от места обработки, отображения и регистрации измерительной информации называют *датчиками*.

Измерительным прибором называют средство измерения, в котором информация об измеряемой величине вырабатывается в форме, удобной для восприятия человеком. Например, в виде цифрового отсчета на отсчетном устройстве или на шкале прибора.

Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины, называют *аналоговым измерительным прибором*. Например, отсчетный прибор со стрелкой и шкалой.

Измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретный (кодированный) сигнал измерительной информации и дающий показания в цифровой форме, называют *цифровым измерительным прибором*.

По способу фиксации результатов различают показывающие и регистрирующие измерительные приборы.

Показывающие приборы допускают только считывание показаний.

Регистрирующие приборы допускают считывание и регистрацию, или только регистрацию показаний.

Регулирующие измерительные приборы – приборы, имеющие приспособления для управления технологическим процессом.

Измерительные приборы, которые осуществляют одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении цепи преобразования называют *приборами прямого преобразования*.

Измерительные приборы, в которых наряду с цепью прямого преобразования, имеется цепь обратного преобразования сигнала измерительной информации, называют *приборами уравнивающего преобразования или приборами сравнения*. Так как в этих приборах происходит сравнение измеряемой величины с известной величиной, однородной с измеряемой величиной.

Выделяют следующие группы приборов среди измерительных аналоговых приборов прямого преобразования:

- электромеханические;
- электромеханические с дополнительными преобразователями;
- электронные.

К группе электромеханических приборов относятся электроизмерительные приборы, в которых энергия электромагнитного поля преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части прибора.

К группе электромеханических приборов с дополнительными преобразователями относятся электроизмерительные приборы с предварительным преобразованием входного сигнала с целью расширения возможностей измерения различных величин.

К группе электронных аналоговых приборов относятся приборы, использующие электронные узлы для преобразования входного сигнала, и электромеханический измерительный механизм.

Измерительная информационная система — совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств, для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки с целью представления потребителю в требуемом виде, либо автоматического осуществления логических функций контроля, диагностирования и идентификации.

Измерительная установка — совокупность функционально и конструктивно объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенных для рациональной организации измерений. *Измерительные установки* используются, например, для градуировки и поверки электроизмерительных приборов.

При описании средств измерений используют следующую классификацию.

По назначению:

- специализированные средства измерений, предназначенные специально для измерения какой-либо физической величины: линейных размеров; относительной деформации, сил (динамометры), параметров механических колебаний (виброметры, акселерометры);
- средства измерений общего назначения: вольтметры, амперметры, усилители, частотомеры.

По рабочему диапазону частот:

- для статических измерений;
- инфразвукового диапазона;
- звукового диапазона;
- ультразвукового диапазона.

По рабочему диапазону измерений:

- большого уровня;
- среднего уровня;
- малого уровня.

По условиям, определяющим точность результата измерения:

- максимально возможной точности;
- контрольно-поверочные;
- технические.

По характеру применения:

- лабораторные;
- для промышленных предприятий;
- для специальных условий эксплуатации;
- переносные;
- стационарные.

По взаимному расположению воспринимающей и остальной части измерительного канала:

- локального действия;
- дистанционного действия.

По механической связи средства измерения с объектом:

- контактные;
- бесконтактные.

По принципу преобразования механических величин в электрические:

- генераторные;
- параметрические;
- с промежуточным преобразованием;

По используемому в измерениях физическому явлению:

- механические;
- оптические;
- акустические;
- электродинамические;
- пьезоэлектрические;
- другие.

По числу компонентов измеряемых векторных величин:

- однокомпонентные;
- двухкомпонентные;
- трехкомпонентные.

Средства измерения параметров вибрации тел добавочно подразделяют по следующим признакам.

По отношению к инерциальной системе отсчета:

- средства измерения параметров абсолютной вибрации;
- средства измерения параметров относительной вибрации.

По связи, используемой в измерениях системы отсчета с движущимся телом:

- средства измерения в собственной системе отсчета;
- средства измерения в назначенной системе отсчета.

По используемому принципу измерения:

- средства измерения кинематического принципа измерения;
- средства измерения динамического принципа измерения.

По виду измеряемых кинематических величин:

- средства измерения параметров линейной вибрации;
- средства измерения параметров угловой вибрации.

3.2. Характеристики средств измерений

Различают статический и динамический режим работы средства измерения. *Статические свойства* средства измерения проявляются при статическом режиме его работы, то есть тогда, когда выходной сигнал считается неизменным в процессе измерения.

Динамические свойства средства измерения проявляются при динамическом режиме его работы, при котором выходной сигнал изменяется во времени в процессе измерения.

Различают метрологические и эксплуатационные характеристики средств измерений. *Метрологические* характеристики определяют результаты и погрешности измерений, *эксплуатационные* характеристики определяют условия применения средств измерений.

3.2.1. Метрологические характеристики средств измерений (статический режим)

К метрологическим характеристикам средств измерений относят:

- функцию преобразования;
- характеристики систематической, случайной и суммарной погрешности;
- вариацию выходного сигнала;
- входной и выходной импедансы;
- динамические характеристики;

- неинформативные параметры выходного сигнала;
- функции влияния;
- наибольшие допустимые изменения метрологических характеристик, вызванные изменениями внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала;
- порог чувствительности;
- разрешающую способность средства измерений.

Функция преобразования — функциональная зависимость принятого параметра выходной величины от принятого параметра входной величины, задаваемой аналитическим выражением или графиком. Если $x(t)$ и $y(t)$ есть входной и выходной сигналы соответственно, а X и Y — принятые параметры для выражения их размера, то функция преобразования это

$$Y = f(X) = Y(X).$$

Функцию преобразования часто называют также *градуировочной характеристикой*. Стремятся иметь линейную функцию преобразования, при которой изменения величин X и Y пропорциональны (рис. 3.2). Нелинейность функции преобразования (рис. 3.3) указывает на нелинейность преобразователя. Отношение величины $Y(X) - Y(0)$ к соответствующей ей величине X называют коэффициентом преобразования:

$$K = f(X) = \frac{Y(X) - Y(0)}{X}.$$

Чувствительность преобразователя — это отношение приращения выходного сигнала ΔY средства измерения к вызвавшему это приращение изменению входного сигнала ΔX :

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

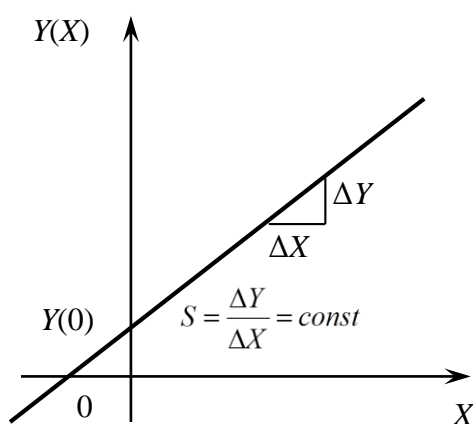


Рис. 3.2. Линейная функция преобразования

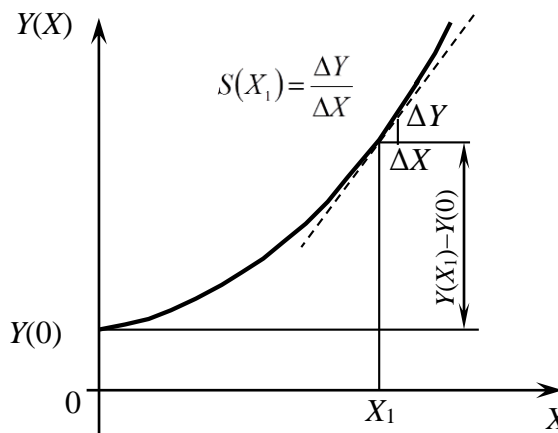


Рис. 3.3. Нелинейная функция преобразования

Для линейной функции преобразования коэффициент преобразования равен чувствительности. При малой нелинейности функции преобразования ее линеаризуют в соответствии с принимаемым критерием близости и характеризуют средство измерения средней чувствительностью. Для средства измерения с неименованной шкалой пользуются постоянной прибора, величиной *обратной чувствительности* $C = 1/S$ при $S = \text{const}$.

Порог чувствительности средства измерений определяется как изменение входной величины, вызывающее наименьшее изменение выходной величины, которое может быть обнаружено с помощью данного средства измерения без каких-либо дополнительных устройств. Порог чувствительности выражается в единицах измеряемой величины.

Цена деления шкалы — разность значений измеряемой величины, соответствующая двум соседним отметкам шкалы. Для цифровых средств измерений указывают цену единицы младшего разряда.

Разрешающая способность средства измерений есть число градаций измеряемой или преобразуемой величины, различимое на выходе средства измерений.

Для средства измерения важной характеристикой являются пределы измерений. Верхним и нижним пределом измерений СИ называется наибольшее и наименьшее значения величины, которые могут быть измерены с нормированной погрешностью.

Диапазон измерений — это область значений между верхним и нижним пределами измерений; может состоять из поддиапазонов, для каждого из которых могут быть нормированы разные погрешности.

3.2.2. Сигналы измерительной информации

В средствах измерения передача, хранение и отображение информации о значениях измеряемых величин осуществляется с помощью сигналов, которые принято называть *сигналами измерительной информации*. Сигнал, как материальный носитель информации представляет собой процесс, один из параметров которого функционально связан с измеряемой величиной, называется *информативным*, а остальные параметры — *неинформативными*.

При прохождении сигналов через средства измерений они могут преобразовываться из одного вида в другой, более удобный для последующей передачи, хранения, обработки и восприятия оператором.

Важным признаком в классификации сигналов является характер изменения во времени и по информативному параметру. По этому признаку различают *непрерывные* (аналоговые) и *дискретные* сигналы. Изменение сигнала по информативному параметру называют изменением по уровню. Дискретные по уровню сигналы называют *квантованными*.

Непрерывные (аналоговые) сигналы по информативному параметру и времени. Они определены в любой момент времени существования сигнала и могут принимать любые значения в диапазоне их изменения (рис. 3.3, а).

Непрерывные по информативному параметру и дискретные по времени сигналы. Такие сигналы определены на некотором конечном или счетном множестве интервалов времени $\Delta t_i = \tau$, где $y(t_i)$ — последовательность значений непрерывного сигнала $y(t)$ определенных в моменты времени t_i (рис. 3.3, б).

Непрерывные по времени и дискретные по информативному параметру сигналы. Информативный параметр может принимать только некоторые разрешенные уровни y_j , отстоящие друг от друга на конечные интервалы (кванты) Δy (рис. 3.3, в).

Дискретные по времени и информативному параметру сигналы. Дискретная последовательность $y_j(t_i)$ значений непрерывного сигнала $y(t)$, принимающая только разрешенные уровни y_j и определенная в дискретные моменты времени t_i (рис. 3.3, г).

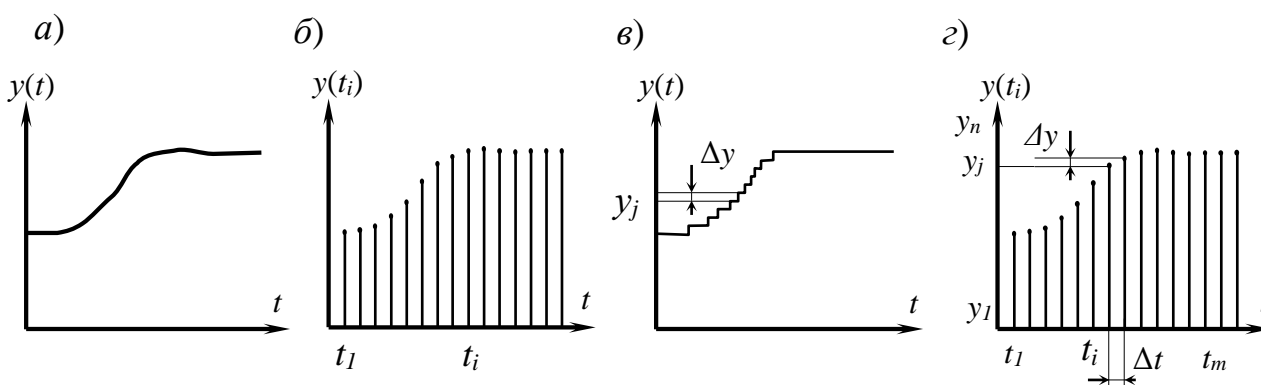


Рис. 3.3. Классификация сигналов:

а – непрерывный по информативному параметру и времени; *б* – непрерывный по информативному параметру и дискретный по времени; *в* – непрерывный по времени и дискретный по информативному параметру; *г* – дискретные по времени и информативному параметру.

3.2.3 Динамические характеристики средств измерения

Динамические характеристики средств измерений отражают их динамические свойства, которые проявляются при действии на них переменного во времени сигнала. Динамические характеристики относятся к метрологическим свойствам средств измерений. Динамические свойства средств измерений определяют их динамическую погрешность. Полная динамическая характеристика однозначно определяет изменение выходного сигнала сред-

ства измерения при соответственном изменении во времени информативного или неинформативного параметра входного сигнала, влияющей величины нагрузки. К полной динамической характеристике относят:

- импульсную переходную характеристику;
- переходную характеристику;
- передаточную функцию;
- амплитудно-частотную характеристику;
- фазочастотную характеристику
- амплитудно-фазовую характеристику
- совокупность амплитудно- и фазочастотной характеристик.

Полная динамическая характеристика позволяет по заданному входному сигналу $x(t)$ находить выходной сигнал $y(t)$.

Частичная динамическая характеристика не отражает полностью динамических свойств средств измерений. К частичным динамическим характеристикам относят:

- время реакции средства измерения;
- коэффициент демпфирования;
- значение резонансной собственной частоты;
- значение амплитудно-частотной характеристики на резонансной частоте.

При измерении величин, значения которых достаточно быстро изменяются во времени, на показания средства измерения начинает существенно оказывать влияние инерционности измерительного механизма.

Показания средства измерения будут определяться не только воздействием измеряемой величины, но и параметрами измерительного механизма, рассматриваемого как динамическая система. Это справедливо, как для регистрирующих, преобразующих, так и усилительных средств, поэтому важным является умение оценить динамические свойства средств измерения.

Измерительная цепь в целом представляет собой совокупность преобразующих, усилительных, показывающих и регистрирующих устройств. Каждое звено измерительной цепи имеет свои динамические свойства, которые в итоге определяют свойства всей цепи. Современные измерительные средства настолько сложны по своему схемному решению и логическому построению, что для исследователя, использующего средства измерения их внутреннее функционирование практически неизвестно. Для описания свойств такого устройства используется понятие «черный ящик».

«*Чёрный ящик*» — термин, используемый для обозначения системы, внутреннее устройство и механизм работы которой очень сложны, неизвестны или неважны в рамках данной задачи. *Метод «черного ящика»* —

метод исследования таких систем, когда вместо свойств и взаимосвязей составных частей системы изучается реакция системы как целого на изменяющиеся условия.

Система, которую представляют как «черный ящик», рассматривается как имеющая некий «вход» для ввода информации и «выход» для отображения результатов работы, при этом происходящие в ходе работы системы процессы наблюдателю неизвестны. Предполагается, что состояние выходов функционально зависит от состояния входов.

Каноническое представление «чёрного ящика» — это полное описание его функций. Два «черных ящика» с одинаковыми каноническими представлениями считаются эквивалентными. Исследователю доступна лишь входная и выходная информация «черного ящика», в данном случае средства измерения. Исследуя реакцию выходных параметров на изменения входных, можно осуществлять прогнозирование поведения «чёрного ящика» при любых заданных условиях.

Для науки такое понятие, как «черный ящик» имеет весьма большое значение. С его помощью в науке были сделаны очень многие выдающиеся открытия. Так, ученый Гарвей еще в XVII веке предугадал строение сердца. Он моделировал работу сердца насосом, позаимствовав идеи из совершенно другой области современных ему знаний — гидравлики.

Практическая ценность метода «черного ящика» заключается, во-первых, в возможности исследования очень сложных динамических систем, а во-вторых, в возможности замены одного «ящика» другим.

Условимся называть входное воздействие $x(t)$ входным сигналом (или просто сигналом), а реакцию $y(t)$ выходным сигналом или откликом.

Подавая на вход определенного вида сигнал, получаем соответствующий ему отклик, что по смыслу будет соответствовать градуировке «черного ящика» на данное входное воздействие. Подавая на вход различные по форме сигналы, получим соответствующие отклики. Такое описание свойств «черного ящика» достаточно, если заранее известна форма сигнала, что на практике бывает довольно редко. Желательно иметь такие характеристики, которые бы вне зависимости от вида сигнала позволили оценить форму отклика и наоборот.

Для измерительных цепей необходимо, чтобы формы сигнала и отклика были идентичны. Будем считать, что две плоские кривые имеют одинаковую форму, если изменением масштаба ординат одной кривой и ее сдвигом по оси абсцисс, эти кривые совмещаются. Входной сигнал и отклик аналогичны этим двум кривым.

Таким образом, характеристики должны описать причины искажения формы отклика по сравнению с формой сигнала, и дать количественную оценку. Внутренние причины искажения:

- нелинейная зависимость между значениями составляющих сигнала и значениями составляющих отклика;
- нарушение амплитудных соотношений, составляющих в отклике по сравнению с такими же соотношениями в сигнале;
- нарушение временных соотношений, составляющих в отклике по сравнению с аналогичными соотношениями в сигнале;
- собственные механические, или электрические колебательные, или апериодические процессы.

Амплитудная характеристика

Представляет собой зависимость между амплитудой отклика и амплитудой сигнала, полученную при некоторой условно принятой или стандартной постоянной частоте гармонического сигнала (рис. 3.4).

Отсутствие искажений формы возможно только в случае линейной амплитудной характеристики. В случае нелинейности амплитудной характеристики искажение формы отклика происходит вследствие появления в отклике составляющих, которых нет в сигнале. Такой вид искажения формы получил название *нелинейных искажений*. Общепринятой количественной оценкой нелинейных искажений является оценка по соотношению мощности добавленных составляющих к суммарной мощности составляющих сигнала.

Наибольшее применение получили измерители нелинейных искажений, предназначенные для измерения степени искажения формы кривой, то есть отличия формы сигнала от гармонической. Количественно искажения оценивают двумя коэффициентами:

- коэффициентом гармоник (коэффициент гармонических искажений, КГИ) K_{Γ} ;
- коэффициентом нелинейных искажений (КНИ) $K_{\text{ни}}$.

На практике коэффициент гармоник рассчитывается по формуле

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}{\sum_{i=1}^{\infty} U_i^2}},$$

где U_i — амплитуда i -й гармоники.

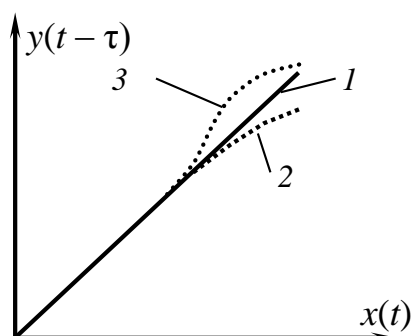


Рис. 3.4. Амплитудная характеристика:
 1 — идеальная (линейная); 2, 3 — возможные реальные; τ — время запаздывания отклика по сравнению с моментом времени начала действия сигнала

Значение K_r может изменяться от 0 до 1.

Коэффициент нелинейных искажений рассчитывают по формуле

$$K_{\text{ни}} = \frac{K_r}{\sqrt{1 - K_r^2}}.$$

При малых $K_{\text{ни}}$ можно считать, что $K_{\text{ни}} \approx K_r$ (в диапазоне $K_{\text{ни}} \leq 0,1$ значения K_r и $K_{\text{ни}}$ отличаются менее чем на 1%. Интересно, что в западной литературе обычно пользуются КГИ, тогда как в отечественной литературе традиционно предпочитают КНИ.

Амплитудно-частотная характеристика

Представляет собой зависимость амплитуды отклика от частоты сигнала при неизменной амплитуде сигнала. Иногда берется относительная частота ω/λ , где ω — текущая частота сигнала (круговая), λ — характерная частота. Обычно берется относительная амплитуда отклика, равная отношению текущей амплитуды A_T к амплитуде отклика на условно принятой частоте A_0 (нулевой частоте 0 Гц; 400 Гц; 1000 Гц и т. д.). Если диапазон изменения частот большой, то используют логарифмический масштаб.

Идеальной амплитудно-частотной характеристикой является прямая параллельная оси частот (рис. 3.5). Отклонение амплитудно-частотной характеристики от идеальной приводит к искажению формы отклика, вследствие нарушения амплитудных соотношений составляющих (рис. 3.6).

Искажение сигнала при нарушении амплитудных соотношений составляющих в отклике по сравнению с такими же соотношениями в сигнале показано на рис. 3.6. Зависимость сигнала от времени описывается формулой

$$x(t) = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t.$$

Вследствие нарушения амплитудных соотношений сигнала и отклика, изменение во времени отклика будет определяться выражением

$$y(t) = A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin \omega_3 t.$$

Условия съема амплитудно-частотной характеристики. Сигнал должен иметь строго гармоническую форму (*клирфактор* не более 1%) и его амплитуда не должна выходить за пределы линейного участка амплитудной характеристики. Изменяя частоту сигнала, при неизменной его амплитуде снимаются показания средства измерения.

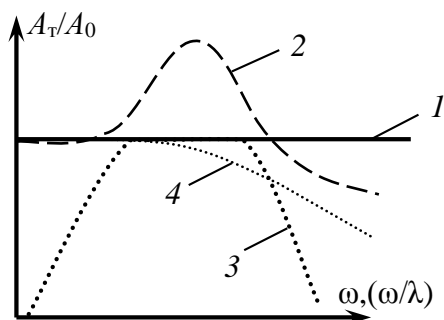


Рис. 3.5. Амплитудно-частотная характеристика:
 1 — идеальная; 2, 3, 4 — возможные реальные характеристики; ω — круговая частота сигнала; λ — характерная частота (например, круговая частота собственных колебаний)

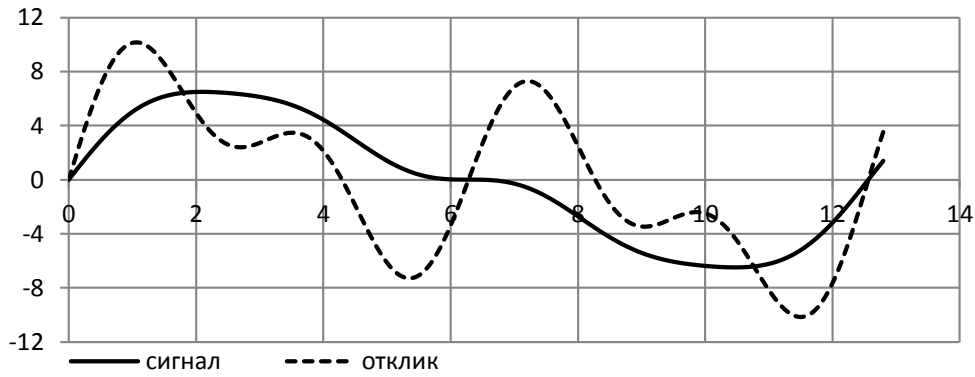


Рис. 3.6. Искажения отклика вследствие нарушения амплитудных соотношений в отклике при $\omega_2/\omega_1=2$; $\omega_3/\omega_1=4$: сигнал при $A_2/A_1=1/3$; $A_3/A_1=1/6$; отклик при $A^o_2/A^o_1=2/1$; $A^o_3/A^o_1=2/3$

Фазочастотная характеристика

Представляет собой зависимость временного запаздывания отклика от частоты сигнала. В большинстве случаев вместо частоты по оси абсцисс откладывается относительная частота ω/λ , а вместо абсолютного запаздывания во времени — нормированный фазовый сдвиг в радианах или градусах:

$$\bar{\varphi} = \frac{360 f \tau}{\omega/\lambda}, \text{ градусы.}$$

Часто ФЧХ используют для оценки фазовых искажений формы сложного сигнала, вызываемых неодинаковой задержкой во времени его отдельных гармонических составляющих.

Вследствие временных искажений отклик изменяется во времени, то есть появляются *искажения вследствие нарушения временных соотношений* составляющих в отклике по сравнению с аналогичными соотношениями в сигнале. Эти искажения определяются выражением

$$y(t) = A_1 \sin \omega_1(t + \tau_1) + A_2 \sin \omega_2(t + \tau_2) + A_3 \sin \omega_3(t + \tau_3).$$

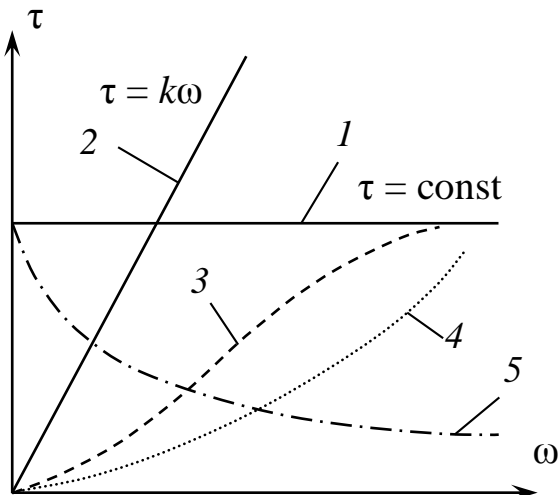


Рис. 3.7. Фазочастотные характеристики: 1, 2 — идеальные характеристики; 3, 4, 5 — возможные реальные характеристики

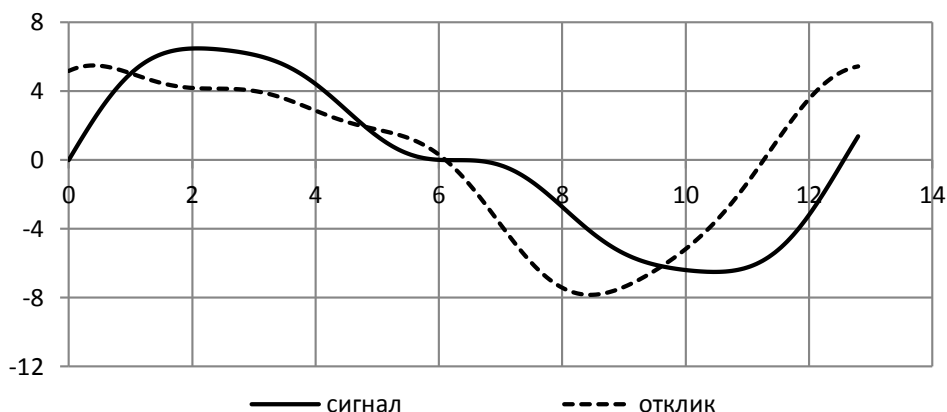


Рис. 3.8. Искажения вследствие нарушения временных соотношений:
 сигнал и отклик при $A_2/A_1 = A^{\circ}_2/A^{\circ}_1 = 1/3$; $A_3/A_1 = A^{\circ}_3/A^{\circ}_1 = 1/6$;
 $\omega_2/\omega_1 = 2$; $\omega_3/\omega_1 = 4$; отклик при $\tau_1/T_1 = 1/2$; $\tau_2/T_1 = 1$; $\tau_3/T_1 = 2$

Изменение сигнала и отклика во времени, с учетом запаздывания составляющих отклика по отношению к составляющим сигнала, приведены на рис. 3.8.

Амплитудно-частотные и фазочастотные искажения носят общее название *линейных искажений* сигнала. Условия снятия ФЧХ одинаковы с условиями снятия АЧХ.

По записи исследуемого процесса (при отсутствии нелинейных искажений) можно восстановить действительную форму сигнала при наличии АЧХ и ФЧХ с использованием поправок и гармонического анализа. Все преобразования сигнала связаны с неизбежной потерей точности. Поэтому при выборе средств измерений необходимо, чтобы в предполагаемой полосе частот сигнала, их динамические характеристики полностью или с допустимыми отклонениями совпадали с идеальными характеристиками. Обычно считаются допустимыми отклонения для амплитудной характеристики 2–3%, отклонения для АЧХ допустимы 5–10%, для ФЧХ 2–3%.

Подбирая динамические характеристики отдельных звеньев измерительной цепи, можно добиться совпадения характеристик с идеальными характеристиками для всей цепи за счет взаимной компенсации соответствующих характеристик отдельных звеньев или за счет введения специальных корректирующих устройств в измерительный прибор.

Специальные испытательные сигналы.

Свойства средства измерения можно исследовать также *путем подачи на вход сигнала специальной формы*, как можно ближе отражающей изучаемый закон изменения входной величины. Это особенно важно, если значение измеряемой величины изменяется достаточно быстро, вследствие чего могут возникнуть собственные затухающие движения или электрические

колебательные процессы, как в отдельных звеньях, так и в общей цепи. Колебания будут накладываться на отклик, в результате этого его форма будет сильно искажаться либо появится апериодическое подползание, что также исказит форму сигнала.

Для этих целей используются сигналы следующих форм: прямоугольный и треугольный импульсы; импульс, у которого передний фронт линейный, а задний спадает по экспоненте; ступенчатый и некоторые другие. Формы перечисленных сигналов приведены на рис. 3.9.

Наиболее просто сигнал генерируется в виде ступеньки по зависимости

$$x(t) = \begin{cases} A \text{ или } 1, & \text{при } t \geq t_0; \\ 0, & \text{при } t < t_0. \end{cases}$$

Естественные воздействия этой формы встречаются довольно часто при включении и выключении измеряемой величины или при действии прямоугольного импульса достаточной длительности. Поэтому отклик на сигнал в виде ступеньки получил специальное название — *переходный процесс* (рис. 3.10). Переходный процесс характеризуется временем достижения в отклике первый раз значения измеряемой величины Δt и размером первого выброса за значение измеряемой величины δ . Время достижения и размер выброса — конкурирующие величины.

Приемлемым компромиссом между ними является размер выброса 5%. В этом случае время достижения равняется примерно половине периода собственных колебаний механической системы или половине периода наивысшей частоты пропускаемой усилительным устройством, колебательный процесс практически отсутствует (рис. 3.10, кривая 1). Кривая 2 — подползание к значению величины (при наличии большого сопротивления). Кривая 3 — затухающий колебательный процесс (при наличии малого сопротивления). Желательно, чтобы переходный процесс соответствовал типу 1.

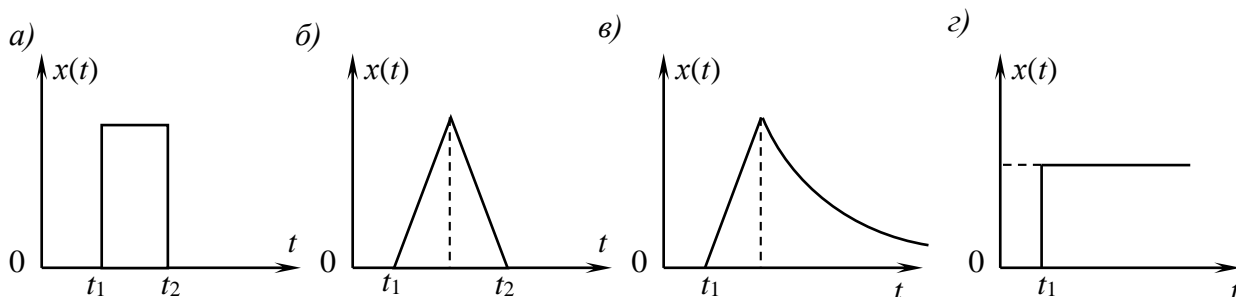


Рис. 3.9. Формы специальных испытательных сигналов:

a – прямоугольный импульс; *б* – треугольный импульс;
в – экспоненциально-спадающий импульс; *г* – ступенчатый сигнал

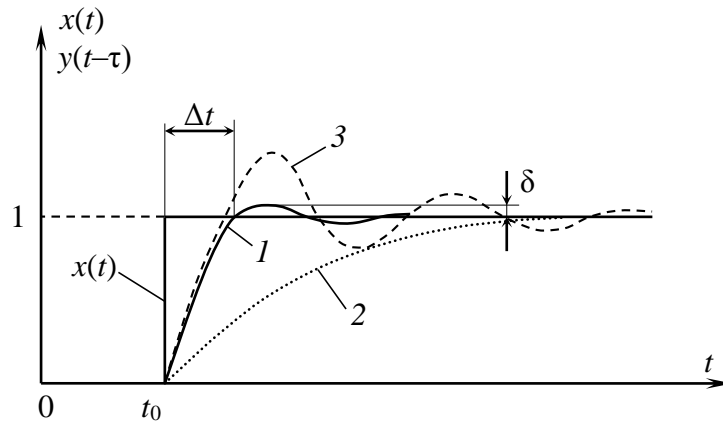


Рис. 3.10. Переходный процесс:

1 – приемлемый переходный процесс; 2 – подползание к значению величины; 3 – затухающий колебательный процесс; $x(t)$ – сигнал; $y(t-\tau)$ – отклик

В случае изменения физической величины, значение которой изменяется по известному закону, вводится понятие динамической погрешности средства измерения, под которой понимается разность между погрешностью средства измерения в динамическом режиме и его погрешностью в статическом режиме работы, соответствующей значению измеряемой величины в момент измерения.

Грамотный выбор средств измерения для исследования динамических процессов требует знания теории колебаний, соответствующих разделов высшей математики, теоретических основ электротехники, а также грамотного учета физических факторов, сопутствующих изучаемому явлению.

3.2.4. Эксплуатационные характеристики средств измерений

Предел измерений (предел преобразования) — наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений или преобразования. Полный диапазон измерений — интервал значений измеряемой или преобразуемой величины от порога чувствительности до верхнего предела измерений. Диапазон измерений задается, как правило, из условий допустимых нелинейных искажений, прочности и т. п.

Рабочий диапазон измерений — часть полного диапазона, в которой относительная погрешность не превосходит заданной величины. Рабочий диапазон частот — интервал частот входных гармонических сигналов, в котором нормированы допустимые погрешности. Нормальное значение, или нормальная область значений влияющей величины — это устанавливаемое предпочтительное значение или область значений влияющей величины, при которой определяют основную погрешность СИ. Рабочая область значений влияющей величины — это область ее значений, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность СИ.

Единые правила установления пределов допускаемых погрешностей показаний по классам точности средств измерений регламентирует ГОСТ 8.401-80.

Класс точности средства измерения — обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей. Классы точности присваиваются средствам измерений при их разработке с учетом результатов государственных приемочных испытаний.

Класс точности хотя и характеризует совокупность метрологических свойств данного средства измерений, однако не определяет однозначно точность измерений, так как точность зависит от метода измерений и условий их выполнения.

Средствам измерений с двумя или более диапазонами измерений одной и той же физической величины допускается присваивать два или более класса точности, а также допускается присваивать различные классы точности для каждой измеряемой величины.

Классы точности цифровых измерительных приборов со встроенными вычислительными устройствами для дополнительной обработки результатов измерений устанавливаются без учета режима обработки.

Пределы допускаемой основной и дополнительной погрешности следует выражать в форме, приведенной, относительной или абсолютной погрешности. Форма выражения зависит от характера изменения погрешностей в пределах диапазона измерений, а также от условий применения и назначения средств измерений конкретного вида. Пределы допускаемой дополнительной погрешности *допускается* выражать в форме, отличной от формы выражения пределов допускаемой основной погрешности.

Пределы допускаемой основной погрешности устанавливаются в следующей последовательности:

- устанавливаются пределы допускаемой абсолютной погрешности по формуле

$$\Delta = \pm a,$$

или

$$\Delta = \pm (a + bx),$$

где Δ — пределы допускаемой абсолютной основной погрешности (в единицах измеряемой величины или условно в делениях шкалы); x — значение измеряемой величины; a, b — положительные числа, не зависящие от x ;

- устанавливаются пределы допускаемой приведенной основной погрешности по формуле

$$\gamma = \Delta / X n = \pm p,$$

где γ — пределы допускаемой приведенной основной погрешности в процентах, Δ — пределы допускаемой абсолютной погрешности, p — положительное число, выбираемое из ряда $1 \cdot 10^n, 1,5 \cdot 10^n, 2 \cdot 10^n, 2,5 \cdot 10^n, 4 \cdot 10^n, 5 \cdot 10^n, 6 \cdot 10^n$ ($n = 1; 0; -1; -2$ и т. д.).

Обозначение классов точности на средствах измерений



Единые правила для определения пределов допустимых погрешностей показаний по классам точности средств измерений регламентирует ГОСТ 8.401-80. Условные обозначения классов точности наносятся на циферблаты, щитки и корпуса средств измерений.

Обозначение класса точности допускается не наносить на высокоточные меры, а также на средства измерений, для которых действующими стандартами установлены особые внешние признаки, зависящие от класса точности, например, шестигранная форма гирь или гирь в форме параллелепипеда и гирь общего назначения.

За исключением технически обоснованных случаев, вместе с условным обозначением класса точности на циферблат, щиток или корпус средств измерений наносится обозначение стандарта или технических условий, устанавливающих технические требования к этим средствам измерений.

На средства измерений, для одного и того же класса точности которых в зависимости от условий эксплуатации установлены различные рабочие области влияющих величин, наносятся обозначения условий их эксплуатации, предусмотренные в стандартах или технических условиях на эти средства измерений. Расшифровка обозначений классов точности приведена в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Обозначения классов точности на средствах измерений

Обозначение класса точности		Форма выражения погрешности	Пределы допускаемой основной погрешности	Примечание
на средстве измерений	в документации			
0,5	Класс точности 0,5	Приведенная	$\gamma = \pm 0,5\%$	нормирующее значение выражено в единицах измеряемой величины
	Класс точности 0,5		$\gamma = \pm 0,5\%$	нормирующее значение принято равным длине шкалы или её части
	Класс точности 0,5	Относительная	$\delta = \pm 0,5\%$	$\delta = \Delta / x$
0,02/0,01	Класс точности 0,02/0,01		$\delta = \pm [0,02 + 0,01 \cdot (x_k / x - 1)] \%$	$\delta = \pm [c + d(x_k / x - 1)]$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Эткин, Л. Г.** Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л. Г. Эткин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 408 с.
2. **Дивин, А. Г.** Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учеб. пособие. Ч. 2. / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев, Г. В. Мозгова. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. – 108 с.
3. **Полилов, А. Н.** Экспериментальная механика композитов: учеб. пособие / А. Н. Полилов. — Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 375 с.
4. **Никитин, В. А.** Методы и средства измерений, испытаний и контроля: учебное пособие / В. А. Никитин, С. В. Бойко. - 2-е изд. перераб. и доп.- Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. - 462 с.
5. **Кузнецова, Е. В.** Экспериментальная механика: учебно-методическое пособие. / Е. В. Кузнецова. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2009. – 43 с.
6. **Авдеев, Б. Я.** Основы метрологии и электрические измерения: Учебник для вузов/ Б. Я. Авдеев [и др.]; под ред. Е.М. Душина. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987 – 480 с.
7. **Демидова-Панферова, Р. М.** Электрические измерения (с лабораторными работами): учебник для техникумов/ Р. М. Демидова-Панферова [и др.]; под ред. В. Н. Малиновского. – М.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
8. **Сошинов, А. Г.** Преобразователи неэлектрических величин: учеб. пособие / А. Г. Сошинов. – ВолгГТУ, Волгоград, 2002. – 36 с.
9. **Антонец, И. В.** Методы расчета и моделирования упругих элементов: учеб. пособие / И. В. Антонец, А. П. Терешенок. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 121 с.
10. **Серегин, М. Ю.** Организация и технология испытаний. Ч. 1. Методы и приборы испытаний: учеб. пособие / М. Ю. Серегин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 84 с.
11. **Славутский, Л.А.** Основы регистрации данных и планирования эксперимента: учеб. пособие / Л. А. Славутский. – Изд-во ЧГУ, Чебоксары, 2006. – 200 с.
12. **Харт Х.** Введение в измерительную технику: [пер. с нем.] / Х. Харт. – М.: Изд-во Мир, 1999. –391 с.
13. **РМГ 29 – 99 ГСИ.** Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 46 с.
14. **Краткий справочник метролога** / Л. Н. Брянский, А. С. Дойников. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 79 с.

15. **Сергеев, А.Г.** Метрология: учеб. пособие / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – М.: Логос, 2000. – 408 с.
16. **Левшина, Е. С.** Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи) / Е. С. Левшина, П. В. Новицкий. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
17. **Алейников, А. Ф.** Датчики (перспективные направления развития): учеб. пособие / А. Ф. Алейников, В. А. Гридчин, М. П. Цапенко. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – 176 с.
18. **Бриндли, К.** Измерительные преобразователи: справочное пособие [пер. с англ.] / К. Бриндли. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
19. **Евтихеев, Н. Н.** Измерение электрических и неэлектрических величин: учеб. пособие / Н. Н. Евтихеев, Я. А. Купершмидт, В. Ф. Папуловский, В. Н. Сукугоров. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
20. **Байда, Л. И.** Электрические измерения: учебник / Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
21. **Эрастов, В. Е.** Измерительная техника и датчики: учеб. пособие / В. Е. Эрастов, Ю. К. Сидоров, В. Е. Отчалко. – Томск: ЦМТДО, 1999. – 178 с.
22. **Алиев, Т. М.** Измерительная техника / Т. М. Алиев, А. А. Тер-Хачатуров. - М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
23. **Букеткин, Б. В.** Экспериментальная механика / Б. В. Букеткин [и др.]; под ред. Р.К. Вафина, О.С. Нарайкина. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 136 с.

**Вешуткин Владимир Дмитриевич
Жуков Александр Евгеньевич**

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Часть 1

Редактор Н. Н. Максимова
Технический редактор Т. П. Новикова
Компьютерный набор и верстка В. Д. Вешуткин, А. Е. Жуков

Подписано в печать 22.09.2016. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,25. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.